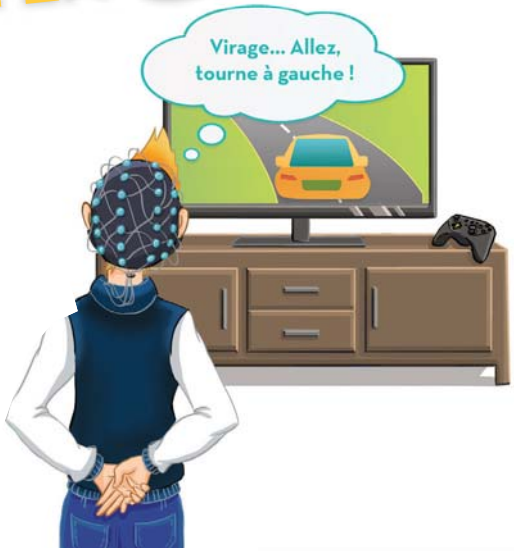
Constantin **AGOURIDAS** • Jean-Claude **BERNIER** • Danièle **OLIVIER** • Paul **RIGNY**

## CHIMIE ET... JUNIOR

Collection dirigée par Bernard **BIGOT**, Président de la Fondation Internationale de la Maison de la Chimie

# LA Chimie DANS LES TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION




edp sciences

Fondation de la Maison de la Chimie

Les textes de cet ouvrage sont majoritairement inspirés du livre *Chimie et technologies de l'information* (Collection Chimie et…, EDP Sciences, 2014) par :

**Constantin Agouridas :** directeur Programmes et Projets à la Fondation de la Maison de la Chimie, ex-directeur de Recherche Aventis et Galderma, ex-professeur et directeur de Relations Industrielles à l'ENSCP

**Jean-Claude Bernier :** professeur émérite de l'Université de Strasbourg, ancien directeur de l'Institut de Chimie du CNRS

**Danièle Olivier :** professeure des universités, vice-présidente de la Fondation de la Maison de la Chimie, ancien directeur de l'ENS Chimie-ParisTech

**Paul Rigny :** ancien rédacteur-en-chef de *L'Actualité Chimique*, ancien directeur de l'Institut de Chimie du CNRS

Pour le coin des jeux, **Michel Criton** est professeur certifié de mathématiques. Il est président de la Fédération française des jeux mathématiques et membre de la rédaction des magazines Tangente et Spécial Logique.

Illustrations : Illustrations (conception - production) : Cécile Parry - www.swities.com

Composition : Patrick Leleux PAO

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-1675-0 – ISSN : 2426-0185

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinés à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2015

# SOMMAIRE

Introduction ..... 4

## PARTIE 1 LES OBJETS CONNECTÉS DU FUTUR

**1.** Commander par la pensée..... 6
**2.** Internet dans un grain de sable ..... 22
**3.** La chimie des écrans souples ..... 35
**4.** Vie et recyclage des appareils et supports numériques ..... 45

## PARTIE 2 LE HIGH-TECH : UN CONDENSÉ DE CHIMIE

**5.** « Exploser » un smartphone..... 56
**6.** Toujours plus petit !..... 64
**7.** Stocker l'énergie pour communiquer..... 74
**8.** Les radars des avions Rafale ..... 82

## PARTIE 3 DES CHIMISTES AU SERVICE DES NOUVEAUX OBJETS INTÉLLIGENTS

**9.** La chimie et les TIC autour du monde ..... 94
**10.** Les chimistes des TIC en France ..... 111
**11.** Les fiches métiers ..... 114

## PARTIE 4 LE COIN DES JEUX

**12.** Énigmes..... 126
**13.** Mots croisés ..... 132

# INTRODUCTION

Nous souhaitons que les jeunes **aiment** les Sciences et qu'ils aient **envie d'en comprendre** les plus récents progrès et l'intérêt qu'elles présentent pour faciliter et améliorer notre qualité de vie.

Nous avons créé **la collection « Chimie et… Junior »** destinée principalement **aux collégiens** et **aux jeunes lycéens** pour leur expliquer de façon simple, agréable et même amusante les applications des Sciences de la chimie dans des domaines qui les concernent et qui sont porteurs d'avenir. Nous espérons aussi les **aider** à mieux **choisir et préparer leur avenir professionnel**.

Le premier volume de cette collection, paru en 2014, a été consacré à la **Chimie dans le Sport**.

**Les technologies de l'information et de la communication (TIC)** révolutionnent notre façon de vivre et de communiquer. Tous les jours, des objets « magiques » que l'on croirait sortis de livres de sciences fiction deviennent la réalité du quotidien et cela n'est pas près de s'arrêter.

Cet ouvrage a pour but d'**expliquer** les applications de la chimie à la réalisation des nouveaux objets intelligents : smartphones, tablettes, écrans… Ce domaine est un merveilleux terrain de jeux ou les jeunes lecteurs pourront, en comprenant comment fonctionnent ces nouveaux objets intelligents, mieux les utiliser et donner libre cours à leur créativité et à leur imagination. Ils y découvriront de nombreux **métiers** passionnants.

Cet ouvrage a été testé sur des collégiens (merci à Max, Baptiste et Laura). Nous espérons qu'il plaira à leurs camarades et qu'il sera à la base de discussions enrichissantes avec leurs professeurs et leurs parents.

Danièle Olivier
Vice-Présidente de la Fondation de la Maison de la Chimie

1 PARTIE

# LES OBJETS CONNECTÉS DU FUTUR

# COMMANDER PAR LA PENSÉE

Grâce aux interfaces cerveau-ordinateur, on sait dès à présent jouer à un jeu vidéo uniquement avec son cerveau ou piloter par la pensée un fauteuil roulant, une prothèse de main…

Pour réaliser une interface cerveau-ordinateur, il faut capter puis utiliser les signaux qui résultent de l'activité électrique émise par notre cerveau quand nous décidons de réaliser une action.

# L'activité électrique du cerveau

Le neurone est la pièce maîtresse de notre cerveau. Il est constitué de trois parties principales : le corps cellulaire, l'axone et les dendrites (*Figure 1*). Les neurones ne sont pas des fils électriques à la différence des axones dont les courants qui y circulent sont très rapides.

Un ***neurone*** est une cellule du système nerveux spécialisée dans la communication et le traitement des informations.

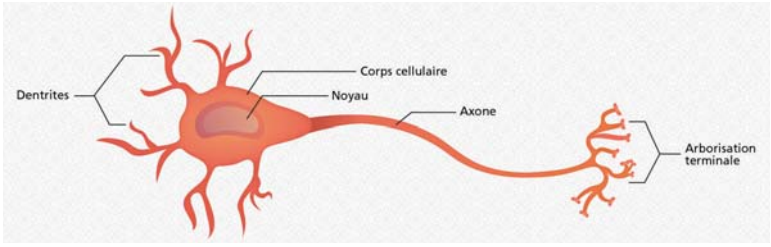



**Figure 1**

Dessin d'un neurone.

Pour bouger, voir ou entendre, les neurones de notre cerveau s'envoient des messages (*Figure 2*). Les neurones communiquent ensemble grâce à leur axone et à leur dendrite : l'axone est la bouche et la dendrite est l'oreille.

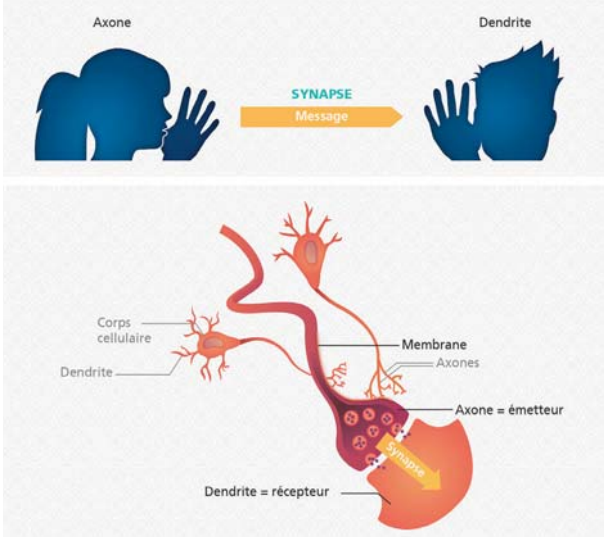



**Figure 2**

Principe de communication entre les neurones.

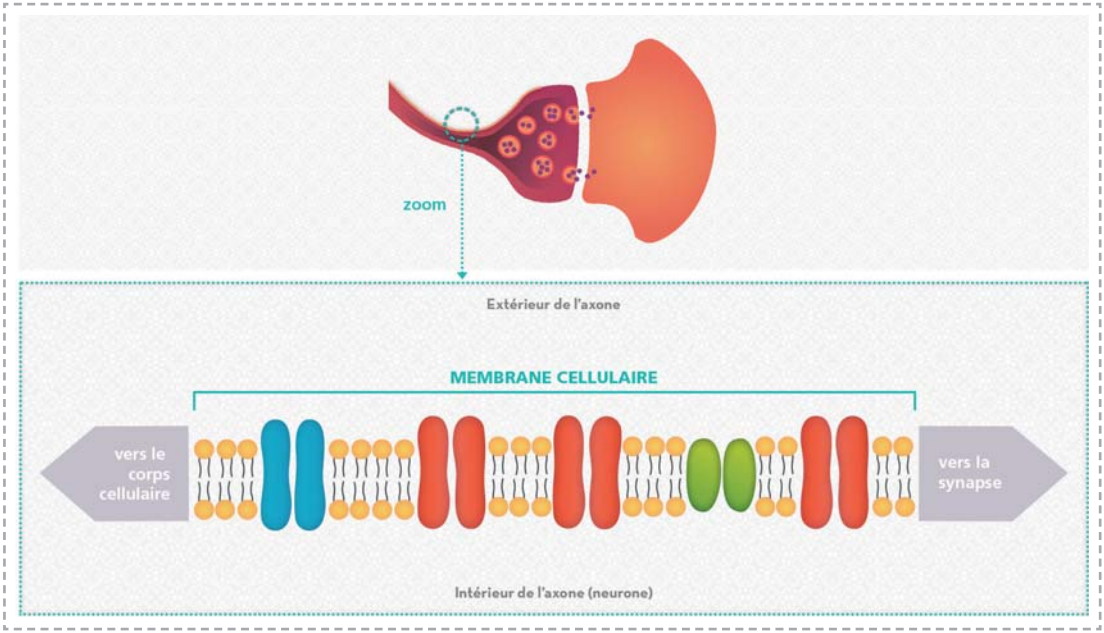
## Comment les neurones communiquent-ils ?

***Les lipides*** sont la famille des molécules qui constituent la matière grasse des êtres vivants.

Chaque neurone (*Figure 2*) est entouré d'une membrane constituée de grosses molécules de la famille des lipides qui le séparent du monde extérieur, comme notre peau le fait pour notre corps. Cette membrane est dessinée sur la *figure 3* où l'on voit les molécules de lipides alignées parallèlement et représentées par les boules jaunes avec deux queues.

**Figure 3**

Dessin de la membrane d'un neurone.




***Les ions*** sont des éléments chimiques chargés positivement ou négativement, respectivement par perte ou gain d'électrons. Le déplacement des ions crée un courant électrique. C'est ce phénomène qui se passe à l'intérieur des batteries.

Le corps humain contient des ions dont les plus importants pour le fonctionnement des neurones sont le sodium, le potassium et le calcium qui portent des charges électriques positives ($Na^+$, $K^+$ et $Ca^{2+}$) et les ions chlorures qui portent une charge électrique négative ($Cl^-$).

## Quand les neurones sont muets

Dans les conditions normales, ces ions sont présents en quantité différente à l'intérieur et à l'extérieur des neurones.

Les canaux ioniques sont comme des portes, ouvertes ou fermées, situées dans la membrane et qui permettent, uniquement aux ions, de rentrer ou de sortir du neurone. Ces canaux ioniques sont représentés en rouge, bleu et vert sur la *figure 3*.

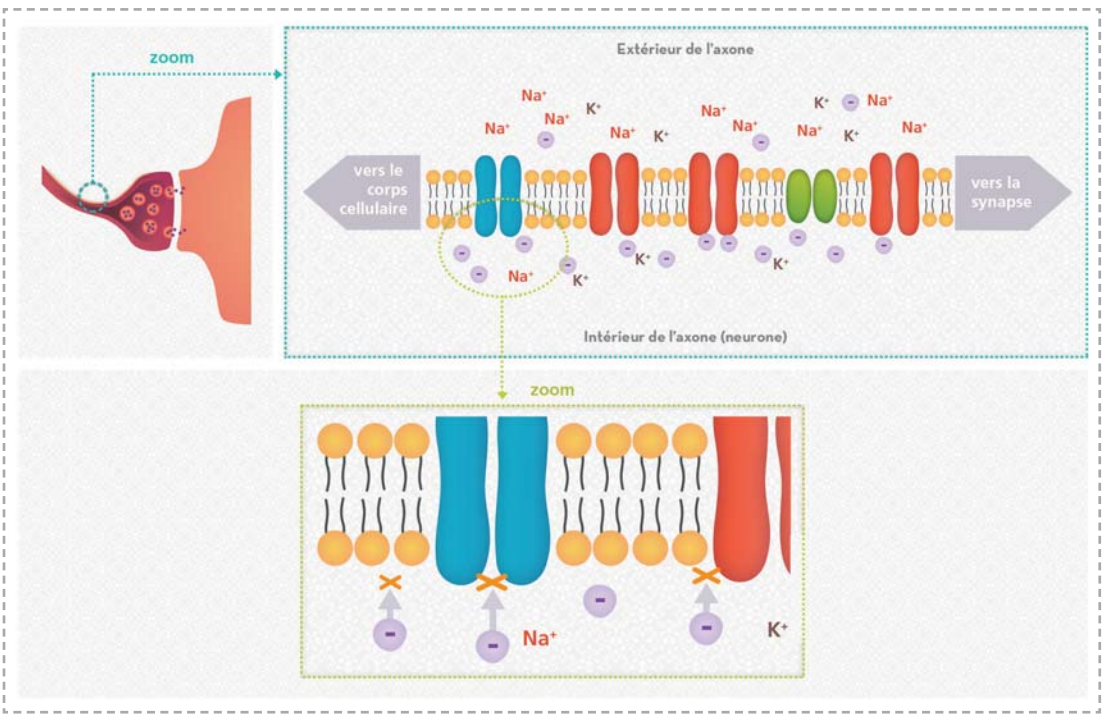
À l'intérieur du neurone, il y a aussi des grosses molécules de protéines en excès qui portent des ions négatifs (représentés en mauve) mais qui ne peuvent jamais sortir par les canaux ioniques du fait de leur taille (*Figure 4*).

**Remarque**

Au repos, il y a beaucoup plus d'ions sodium à l'extérieur du neurone.

**Figure 4**

Canaux ioniques fermés : pas d'échange d'ions au travers de la membrane.



***La synapse*** est l'espace situé entre l'axone d'un neurone (émetteur 1) et la dendrite d'un neurone (récepteur 2), à travers lequel va se faire la transmission de l'information, sous forme de molécules chimiques (les neuromédiateurs) et d'un courant électrique produit par le déplacement des ions.

**Remarque**

Les ions de même charge se repoussent et les ions de charge différente s'attirent.

# Quand les neurones se parlent

Quand le cerveau émet un message, il envoie une excitation sous forme de signal électrique :

– le signal circule dans le neurone sous forme d'un courant électrique, créé par un déplacement d'ions chargés positivement ;

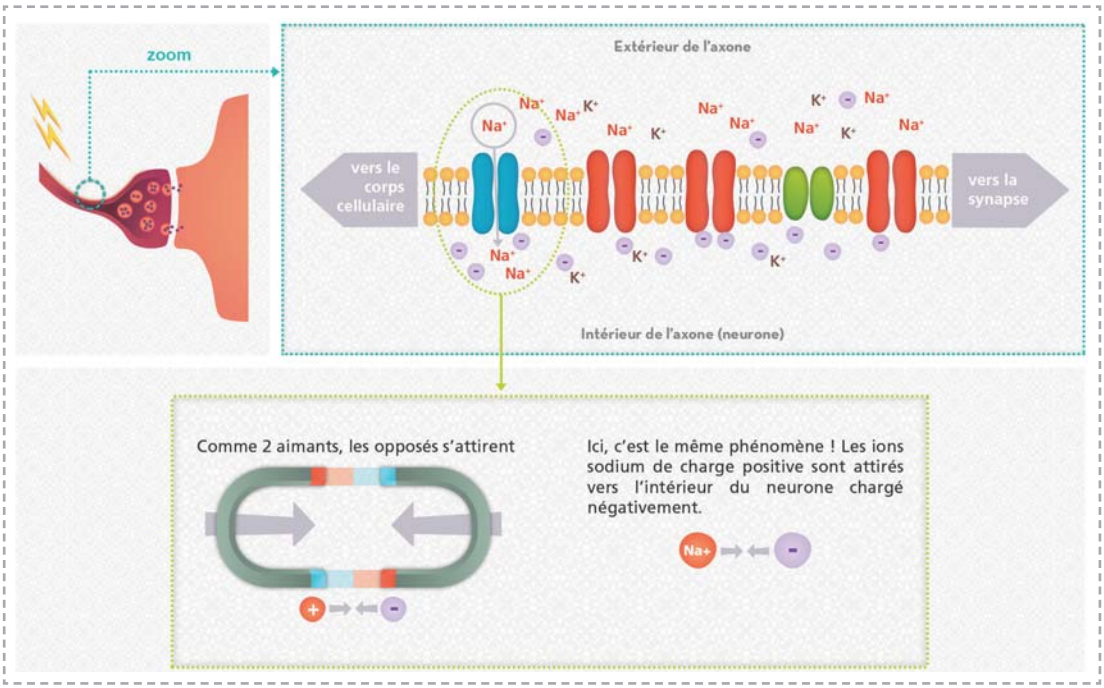
– le passage d'ions chargés et de molécules d'un neurone à l'autre, à travers l'espace appelé synapse, permet aux neurones de se parler et donc de transmettre le message.

# Le courant électrique dans les neurones

Quand un neurone reçoit une excitation électrique (par exemple, un excès d'ions positifs), les canaux ioniques bleus de la *figure 5A* s'ouvrent et les ions sodium, plus nombreux à l'extérieur, se précipitent à l'intérieur du neurone.

**Figure 5A**

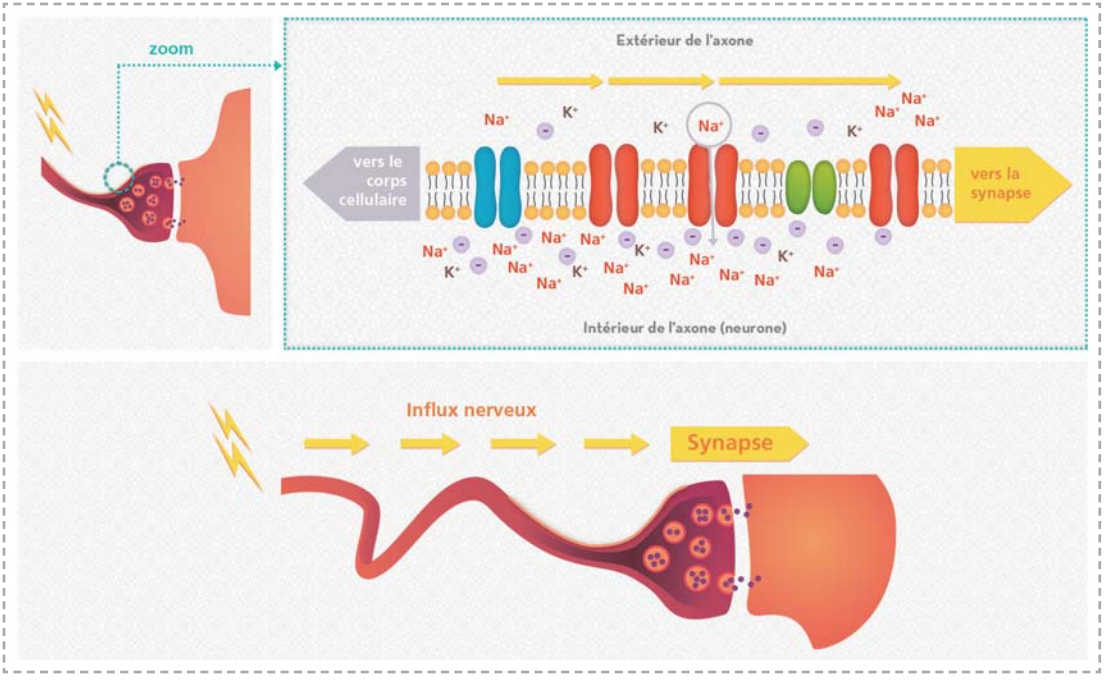
Canaux ioniques ouverts : échange d'ions au travers de la membrane.



Ainsi, les ions $Na^+$ qui entrent, repoussent les premiers arrivés et la zone d'ions positifs se déplace vers le canal ionique rouge, ce qui déclenche l'ouverture de ce dernier (*Figure 5B*) permettant alors à de nouveaux ions $Na^+$ extérieurs d'entrer dans le neurone.

**Figure 5B**

Création d'un influx nerveux.




Un nuage d'ions positifs se déplace ainsi, de proche en proche, à l'intérieur du neurone et produit le courant électrique qui circule dans l'axone comme dans un fil électrique.

Inversement, à l'extérieur de la membrane du neurone, il y a de proche en proche un appauvrissement d'ions positifs, équivalent à la circulation d'un courant électrique en sens inverse.

**Remarque**

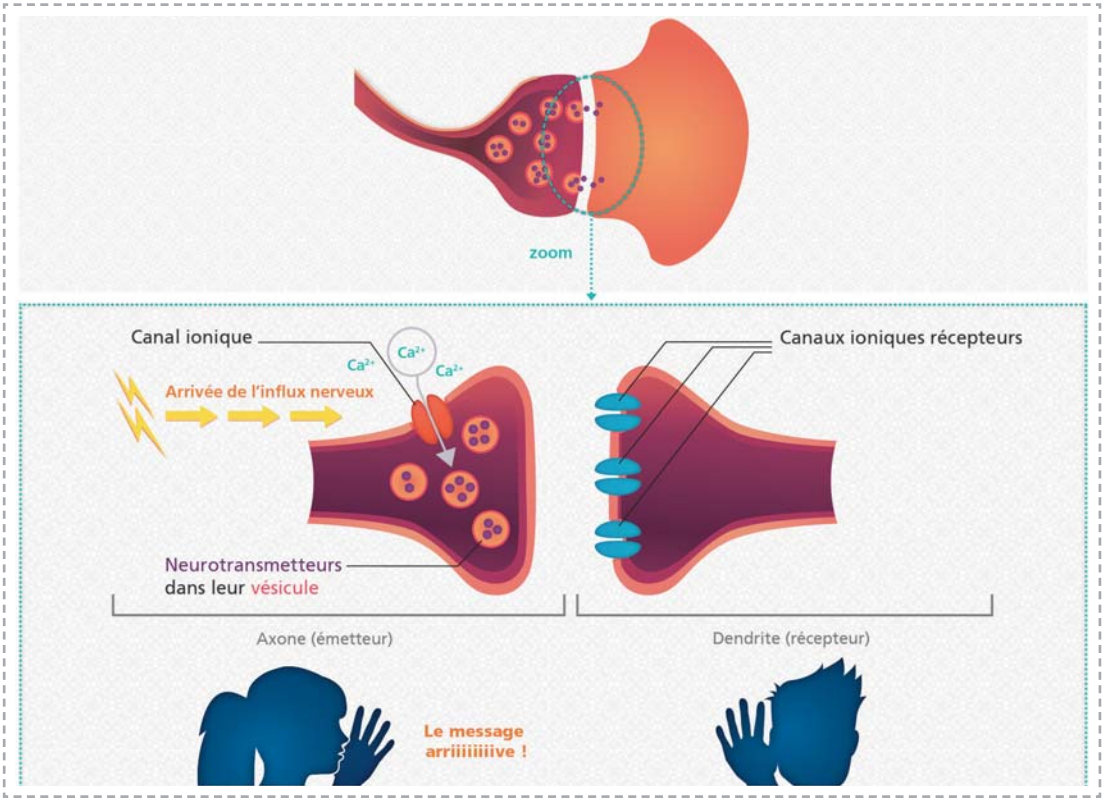
Quand l'intérieur du neurone devient trop « positif », l'ouverture des canaux ioniques se déclenche laissant passer ainsi les ions potassium. Ces ions $K^+$, plus nombreux à l'intérieur du neurone, se précipitent à l'extérieur pour ramener le neurone à son état de charge initial.

# Le passage du courant électrique entre les neurones

Quand la charge positive, liée à l'entrée massive des ions $Na^+$, arrive vers l'extrémité de l'axone, elle déclenche alors l'ouverture des canaux ioniques rouges qui baignent dans une soupe d'ions $Ca^{2+}$ comme le montre la *figure 6*.

**Figure 6**

La synapse, espace entre deux neurones.




***Les neuromédiateurs***, aussi appelés neurotransmetteurs, sont des molécules qui assurent le transport de l'information. Présents dans les neurones, ils sont stockés dans des petits sacs nommés vésicules et sont localisés au voisinage des synapses.

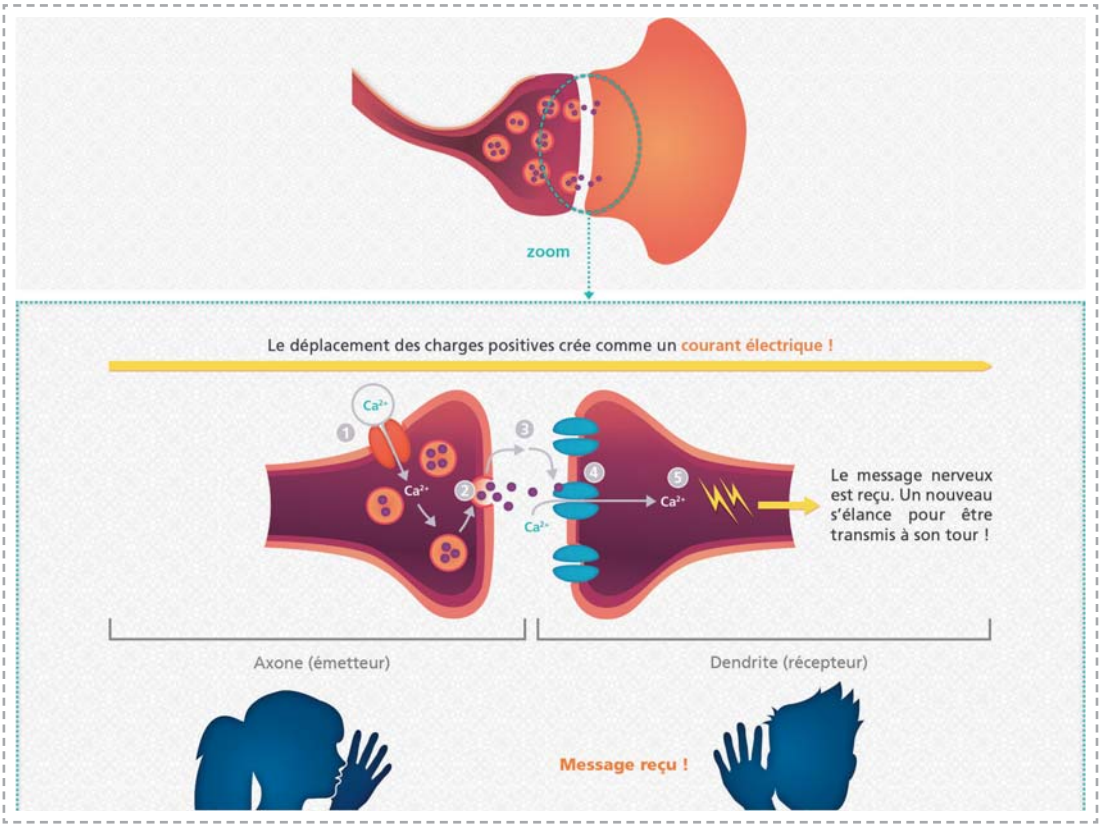
Quand la quantité de calcium augmente, les vésicules qui contiennent les neurotransmetteurs s'ouvrent. Les molécules de neurotransmetteurs libérées migrent à travers la membrane du neurone émetteur, puis dans la synapse pour aller se lier aux récepteurs de la dendrite (l'oreille) du neurone récepteur voisin (représentés en bleu sur la *figure 7*).

Ces récepteurs sont aussi des canaux ioniques ouverts et laissent donc entrer les ions calcium positifs. Ces ions se précipitent à l'intérieur de la dendrite qui, ainsi que le corps cellulaire relié, prennent alors une charge électrique positive, déclenchant à son tour l'ouverture des canaux ioniques permettant l'entrée des ions $Na^+$ dans l'axone du neurone récepteur.

**Remarque**

Ce déplacement d'ions positifs dans le neurone et d'un neurone à l'autre est donc l'équivalent d'un courant électrique.

**Figure 7** Passage de l'influx nerveux à travers la synapse.

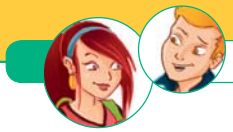



**Remarque**

L'importance du rôle des ions et notamment ceux de calcium, sodium et potassium dans l'activité cérébrale, explique pourquoi il est important de vérifier dans les analyses de sang que leur quantité correspond à la valeur normale.

**Remarque**

Ces charges se déplacent à très grande vitesse : de 1 à 100 mètres par seconde soit à 360 km/h, c'est-à-dire plus vite que la vitesse d'un avion qui décolle (250 km/h).



## Le courant électrique à l'extérieur des neurones

Les entrées et sorties d'ions se font en sens inverse dans la matière cérébrale dans laquelle baigne le neurone, et donc conduisent elles aussi à des courants électriques mais en sens opposé.

Cette activité électrique extérieure est détectée par une technique appelée l'électroencéphalographie (EEG).

**Remarque**

Ces courants électriques extérieurs sont d'intensité très faible, de l'ordre de 1/1 000 000 000 d'ampère.

## Les électroencéphalogrammes (EEG)

Pour que l'activité électrique du cerveau puisse être détectée par électroencéphalographie, il faut que des déplacements de charges semblables à celles décrites précédemment soient créés au même moment et dans le même sens dans une zone du cerveau suffisamment étendue, sachant qu'il y a environ 10 000 neurones/mm$^3$.

Ces courants sont le plus souvent captés à la surface du crâne par des électrodes dans des zones voisines de celles actives du cerveau (celles qui communiquent). Plus il y a d'électrodes, plus l'analyse des courants du cerveau et des messages auxquels ils sont associés est précise.

Les chimistes doivent mettre au point des électrodes très sensibles pour détecter ces faibles courants et collaborer avec des électroniciens pour amplifier le signal perçu.

**Remarque**

Les électrodes sont disposées sur un bonnet posé sur le crâne du patient ou du sujet.

**Remarque**

Le nombre d'électrodes nécessaires varie d'une vingtaine pour commander des jeux simples jusqu'à plusieurs centaines dans des applications médicales ou les études du cerveau.

**Remarque**

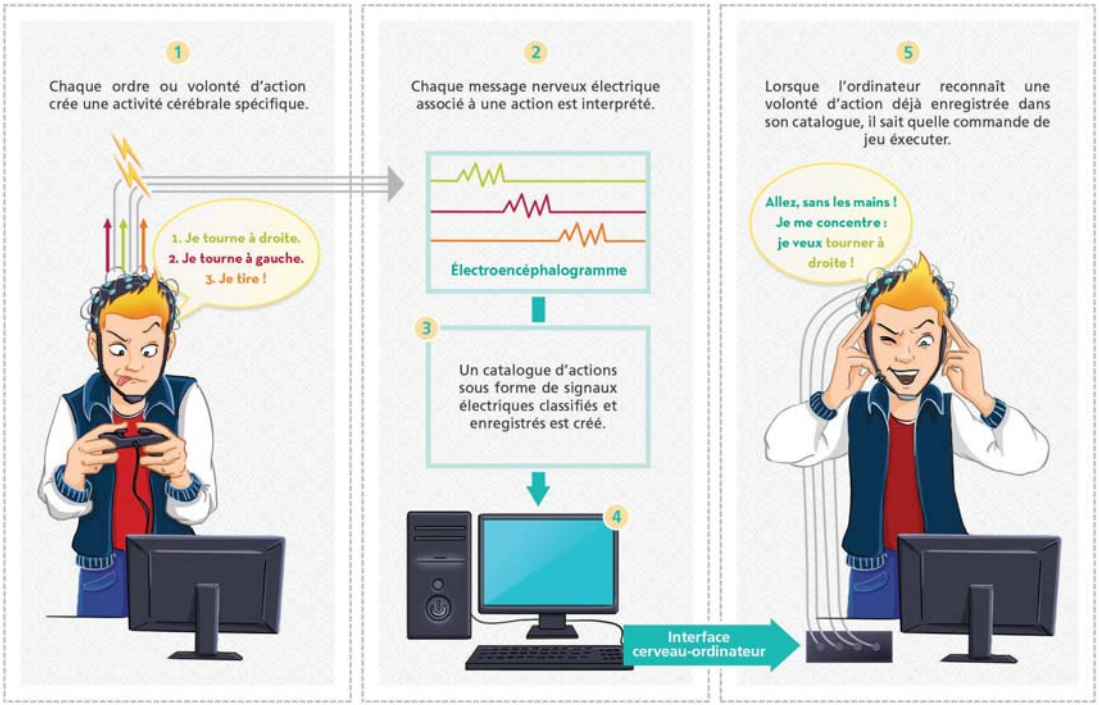
Les sciences qui étudient notre cerveau sont dites cognitives.

# Utiliser les courants du cerveau pour piloter un ordinateur

Dans une interface cerveau-ordinateur, les courants captés par les électrodes de mesure sont transformés en signaux adaptés au pilotage de l'ordinateur (*Figure 8*).

**Figure 8**

Principe de commandes par la pensée.




Les exemples d'applications vont du domaine multimédia et du divertissement à la lutte contre le handicap. Voyons quelques exemples.

## Un vaisseau spatial tu soulèveras

L'expérience se déroule dans la salle de réalité virtuelle appelée Immersia du centre de recherches de l'INRIA à Rennes.

**Remarque**

L'INRIA est un organisme de recherche dédié aux sciences et technologies du numérique.

Cette salle est l'une des plus grandes au niveau mondial qui permet de s'immerger dans un monde en 3D en stéréoscopie. Tout se passe comme si on était devant un écran de cinéma en 3D où tout se voit, autour de soi, en relief. La situation est représentée sur la *figure 9*. C'est une séquence inspirée du film « l'Empire contre-attaque », saga de la « Guerre des étoiles » de Georges Lucas.

**Figure 9**

La salle immersive Immersia (Inria/IRISA, Rennes).

**Figure 10**

Commander par la pensée via un casque muni d'électrodes.

En s'équipant d'un casque (du type EEG) à électrodes portable Blue Tooth sans fil à 16 électrodes (*Figure 10*), on peut, comme le héros Luke Skywalker, se concentrer et soulever par la force de la pensée le vaisseau spatial virtuel (*Figure 11*). Que la force soit avec toi !

**Figure 11**

Une des applications de divertissement de la salle Immersia.

## Contrôler par la pensée, un jeu vidéo

Le jeu vidéo « mineshooter » est développé par une équipe de l'INRIA de Rennes. Le joueur doit concentrer son attention sur des cibles lumineuses qui clignotent à trois vitesses différentes (A, B, C).

Quand le joueur se concentre visuellement sur la cible A, la vitesse de clignotement de cette cible se retrouve dans le courant émis par la

zone visuelle correspondante de son cerveau. Ce courant peut alors être utilisé pour activer une commande de l'ordinateur vers cette cible.

L'entraînement permet au joueur de devenir plus efficace (*Figure 12*).

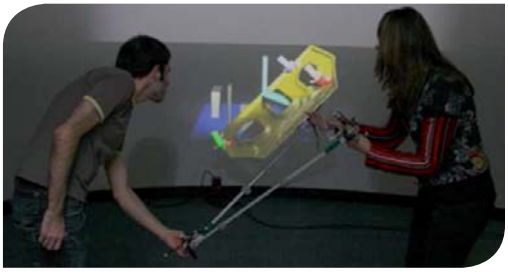


**Figure 12**

Le jeu « mineshooter » (exemple de recherche en réalité virtuelle, interface cerveau-ordinateur).

## Piloter un objet par la pensée

Des prototypes permettent, dès à présent, de piloter par la pensée un fauteuil roulant, une prothèse…

Ainsi, par exemple, des patients paralysés peuvent retrouver une motricité grâce à des prothèses pilotées par l'activité cérébrale des aires qui contrôlent nos mouvements : les aires motrices (*Figure 13*).

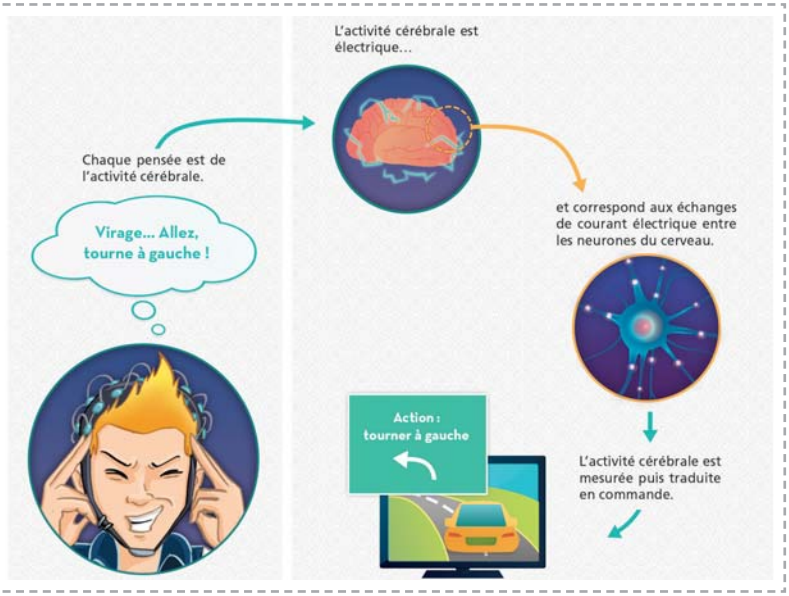



**Figure 13**

De la pensée à l'action.

Cette possibilité d'interagir sans bouger, uniquement à partir de l'activité cérébrale, a aussi été utilisée pour contrôler une multitude d'autres objets tels que des robots et des voitures, même si aujourd'hui, nous sommes encore loin des performances obtenues avec un clavier et une souris.

Dans ces exemples d'application, c'est toujours l'activité électrique des neurones du cerveau qui est utilisée.

### *Remarque*

Cette activité électrique est mesurée à la surface du crâne par un bonnet à électrodes en utilisant les systèmes d'électroencéphalographie des médecins.

Les courants du cerveau sont différents et sont détectés dans des zones dissemblables selon la nature et le type d'action que l'on décide de faire (*Figure 14*) :

– si on utilise les yeux, on mesurera un courant dans les aires visuelles ;

– si on utilise les oreilles, ce sera dans les aires auditives ;

– si on utilise les membres, cela concernera les aires motrices.

**Figure 14**

Localisation des différentes aires du cerveau.

# Comment utiliser efficacement les courants du cerveau ?

1 Il faut identifier, dans le courant enregistré par chaque électrode, les signaux qui correspondent à une action donnée, c'est-à-dire à un ordre du cerveau tel que :

– ouvrir ou fermer les yeux ;

– imaginer un mouvement de la main gauche ou de la main droite.

Cette identification est difficile et demande un travail important d'analyse et de classification, fait par des mathématiciens.

2 Une fois que les signaux associés à un ordre du cerveau sont identifiés et classés, il faut les traduire en commandes pour l'ordinateur. Par exemple, imaginer un mouvement de la main gauche ou de la main droite doit être associé à bouger une souris ou un curseur d'ordinateur vers la gauche ou vers la droite.

3 La dernière étape est un retour visuel, auditif ou tactile, vers l'utilisateur pour lui permettre de s'entraîner et mieux contrôler son activité cérébrale.

## L'évolution du matériel

Il existe pour des patients, sévèrement paralysés, des systèmes dans lesquels les électrodes de détection sont implantées à l'intérieur du crâne, mais plus fréquemment les systèmes utilisent des électrodes posées sur la surface du crâne pour enregistrer les signaux électriques.

Une autre tendance est de remplacer les électrodes médicales humides, qui utilisent du gel pour assurer une bonne captation de l'activité électrique, par des électrodes sèches plus confortables mais qui doivent donc être très sensibles.

Une autre évolution récente, conçue dans une optique d'application aux jeux vidéos, est le développement des casques grand public qui

**Remarque**

La tendance actuelle est d'augmenter le nombre de capteurs avec des systèmes EEG allant jusqu'à 200 parfois 500 capteurs.

peuvent être achetés directement sur Internet et dont le prix (250 €) est beaucoup moins élevé que celui des casques médicaux (15 000 à 30 000 €).

Il reste cependant aux chimistes et électroniciens à améliorer les capteurs, c'est-à-dire les électrodes, pour rendre les systèmes plus efficaces, moins encombrants et plus faciles à utiliser.

Il faut également améliorer l'identification et la classification des signaux du cerveau pour filtrer les signaux caractéristiques de l'activité cérébrale que l'on souhaite utiliser, ce qui implique une collaboration étroite avec les spécialistes des neurosciences.

# Les perspectives pour l'avenir

Ces interfaces cerveau-ordinateur multi-utilisateurs permettent aujourd'hui à plusieurs personnes d'interagir ensemble avec leurs cerveaux, même à distance, soit pour coopérer, soit pour s'affronter mentalement.

Dans un jeux de « Hand Ball Virtuel » où il faut marquer des buts à gauche ou à droite, les joueurs peuvent, soit jouer ensemble, soit jouer l'un contre l'autre. Il faut mobiliser l'imagination du mouvement de sa main gauche ou de sa main droite en fonction de la direction où l'on veut tirer (*Figure 15*).

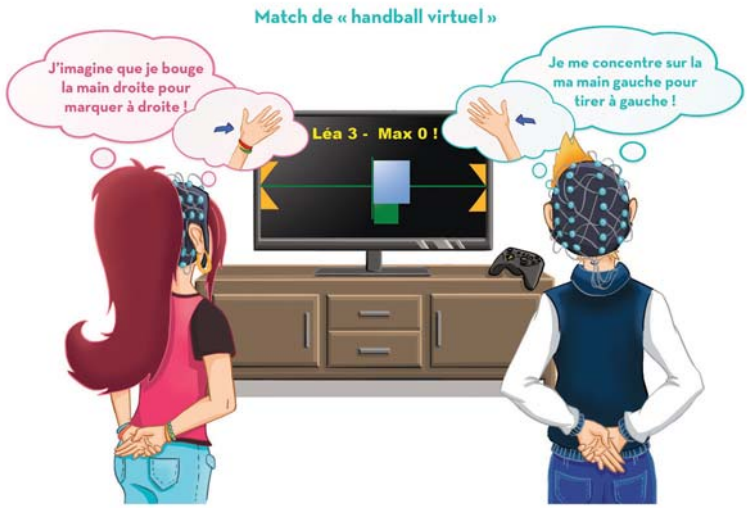


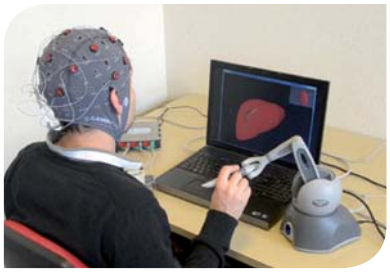

**Figure 15**

Interface cerveau-ordinateur multi-utilisateurs (exemple du « handball virtuel », se concentrer sur l'action pour diriger le mouvement).

L'interface cerveau-ordinateur peut aussi être utilisée comme outil d'assistance pour mesurer et surveiller l'activité cérébrale et par exemple détecter une fatigue mentale élevée. Cette application a été testée dans un simulateur de formation médicale en réalité virtuelle (*Figure 16*).

**Figure 16**

Simulateur médical « adaptatif » par interface cerveau/ordinateur permettant à un chirurgien par exemple de s'exercer à pratiquer des actes chirurgicaux.



Dans cet exemple, si une fatigue mentale est détectée sur un apprenant qui s'entraîne sur des actes chirurgicaux, un système d'assistance visuelle ou haptique est activé.

Il existe dès à présent des prototypes impressionnants utilisant différents types d'activité cérébrale dans différents domaines d'application. Cependant, le développement de ces technologies en est à ses débuts, comparable à celui des technologies de reconnaissance vocale il y a vingt ans.

Les domaines d'application attendus sont très nombreux : le domaine médical, le handicap, la rééducation mais aussi le multimédia et le contrôle d'engins variés.

## Conclusion

**La recherche dans ce domaine est active partout dans le monde notamment aux États-Unis, en Autriche et au Japon et de plus en plus en France. Elle exige la collaboration des scientifiques de la chimie, des mathématiques, de l'électronique, des neurosciences et des médecins.**

# INTERNET DANS UN GRAIN DE SABLE

## *Les fibres optiques*

Dans le réseau internet, le transport de l'information d'un point à l'autre se fait généralement au moyen d'une onde électromagnétique.

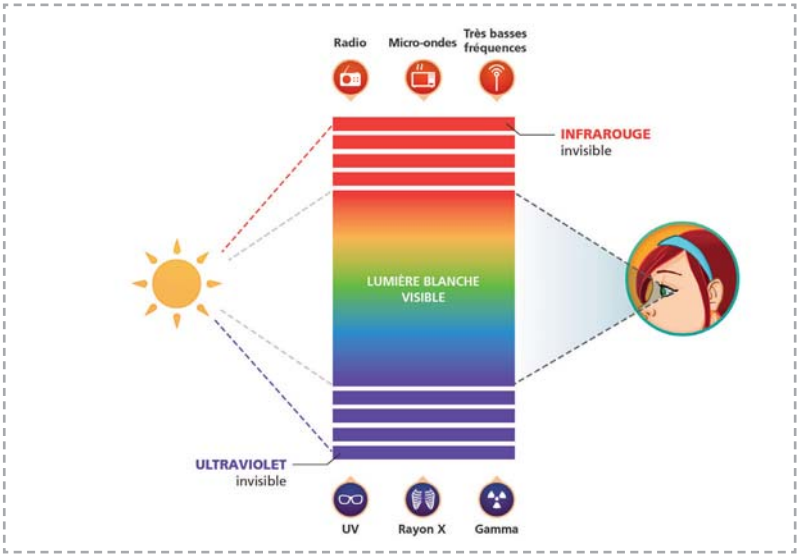
### La lumière visible

Un ***prisme*** est un solide de forme pyramidal.

Les rayons du Soleil sont des ondes électromagnétiques. Notre œil n'en voit qu'une petite partie : c'est la lumière visible ou lumière blanche. L'arc-en-ciel ou la traversée d'un prisme en verre par un rayon de lumière blanche nous montre que cette lumière visible est elle-même constituée de très nombreux rayons lumineux, chacun d'une couleur différente (*Figure 1*).

**Figure 1**

Décomposition de la lumière blanche à travers un prisme.



Nous ne voyons pas la plus grande partie des rayons du Soleil, pourtant nous savons qu'ils existent : par exemple, les rayons ultraviolets (UV) détruisent notre peau et nous devons nous en protéger avec des crèmes solaires. Les rayons infrarouges ou les rayons des fours micro-ondes sont des rayons qui chauffent.

Il faut donc caractériser ces rayons que nous ne voyons pas, par autre chose que leur couleur. Comme toutes les ondes, une onde électromagnétique est caractérisée par sa longueur d'onde λ.

Pour comprendre, prenons comme exemple un caillou jeté dans l'eau, il crée une onde de choc : le niveau de l'eau descend et remonte régulièrement en fonction du temps. Cette onde se déplace à partir du point de chute du caillou puisque l'on voit des cercles successifs dont le rayon s'agrandit avec le temps (*Figure 2*).

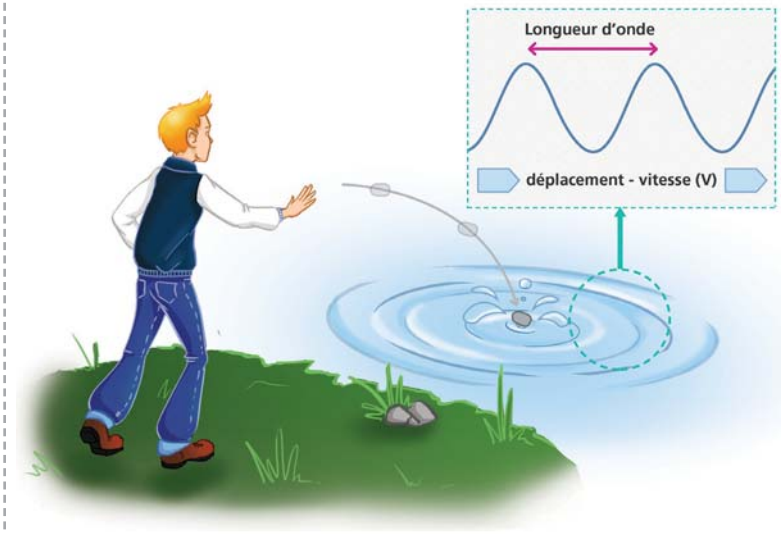



**Figure 2**

Création d'une onde de choc provoquée par le jet d'un caillou dans l'eau.

***La Longueur d'onde*** λ est la distance entre deux points, où l'eau monte ou descend de façon identique ; pour la mesurer facilement, il faut prendre la distance entre deux crêtes ou deux trous.

***La vitesse V*** de l'onde est la vitesse avec laquelle les crêtes et/ou les trous se déplacent.

## Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ?

Un aimant crée un champ magnétique B qui par exemple attire les objets métalliques.

Dans une batterie, l'électrode positive attire les éléments porteurs de charges négatives, tandis que l'électrode négative attire les éléments

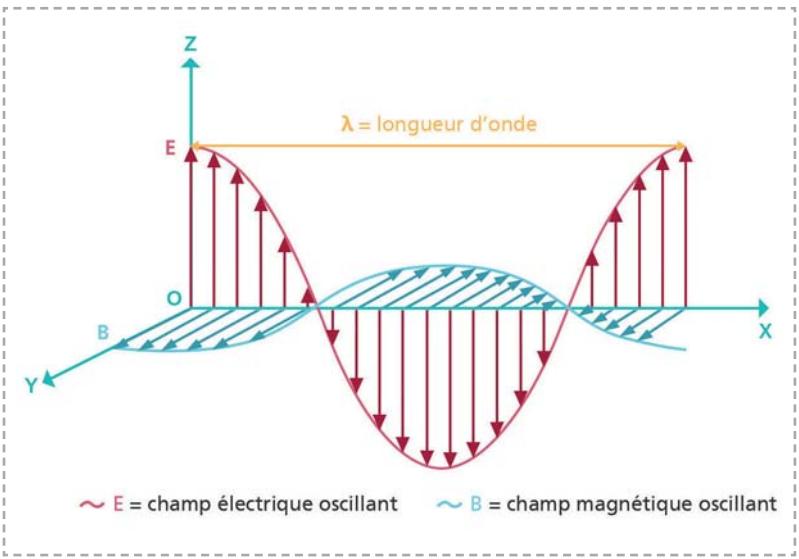
porteurs de charges positives : cela parce qu'il existe un champ électrique E entre les deux électrodes d'une batterie.

Une onde électromagnétique est constituée d'un champ magnétique et d'un champ électrique perpendiculaires l'un à l'autre. Comme la hauteur des ondes qui se propagent à la surface de l'eau, la valeur de ces deux champs oscille régulièrement avec le temps.

De même que l'onde à la surface de l'eau, les deux champs électrique et magnétique se propagent ensemble, et dans une direction orthogonale avec une vitesse V (*Figure 3*).

**Figure 3**

Dessin d'une propagation de champs électrique et magnétique.




**Remarque**

La propagation de ces ondes s'effectue à une vitesse V qui dépend du milieu dans lequel elle se déplace. Dans le vide, cette vitesse est de 300 000 km/s.

Comme toutes les ondes, l'onde électromagnétique (soit le rayon lumineux) est caractérisée par sa longueur d'onde λ : c'est la distance qui sépare deux crêtes (ou deux minima) de la *figure 3.*
Elle s'exprime en nanomètre (1/1 000 000 000 m), en micromètre (1/1 000 000 m) ou en millimètre.

La longueur des ondes utilisées dans les communications Internet est de l'ordre du millimètre, c'est-à-dire très proche de celle des rayons de la lumière visible, du coté du rouge (*Figure 4*).

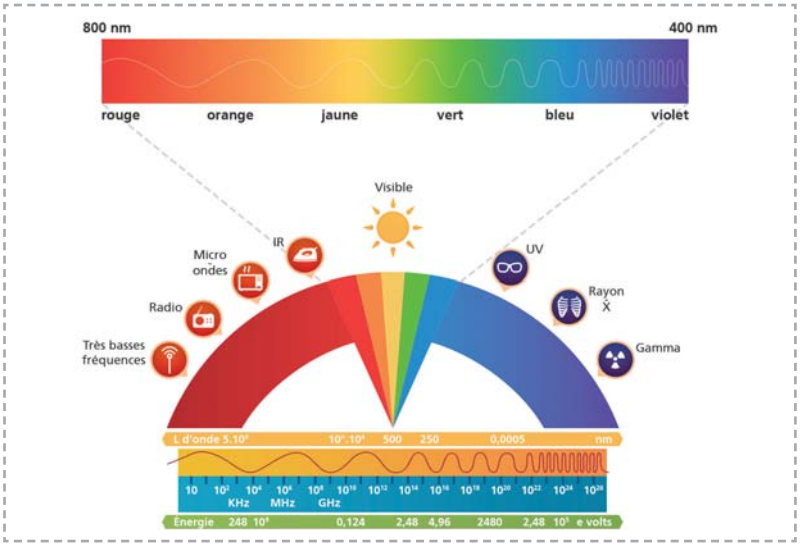



**Figure 4**

Spectre électromagnétique qui caractérise les ondes en fonction de leur longueur d'onde.

## La lumière peut-elle rester prisonnière d'un milieu transparent ?

La réponse est oui et pour le prouver rappelons l'expérience simple de la fontaine lumineuse de Daniel Colladon (1884) : la lumière reste prisonnière du filet d'eau dans lequel elle se propage (*Figure 5*).

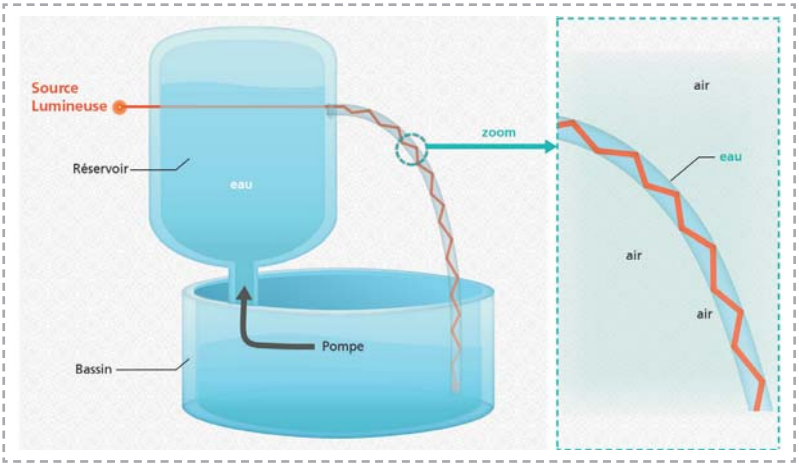



**Figure 5**

L'expérience de la fontaine lumineuse de Daniel Colladon (1884).

De même, la lumière d'un rayon laser reste prisonnière d'une fibre optique dans laquelle elle se propage (*Figure 6*).

C'est ce phénomène qui est utilisé dans les communications Internet, la microchirurgie de l'œil, les images internes du corps humain.

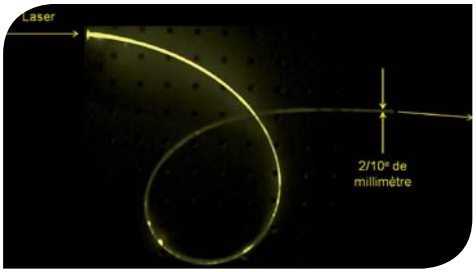



**Figure 6**

Rayonnement laser injecté puis véhiculé dans une fibre optique. Une fibre optique dirige la lumière laser sur plusieurs dizaines de kilomètres.

**Remarque**

Le diamètre d'une fibre optique est à peine plus gros que celui d'un cheveu.
Un matériau entoure la fibre pour la protéger du vieillissement, des chocs, ou de la pression. Grâce à cette protection, une fibre optique peut se courber et diriger la lumière sur plusieurs dizaines de kilomètres.

## Qu'est-ce qu'une fibre optique ? Quel est son fonctionnement ?

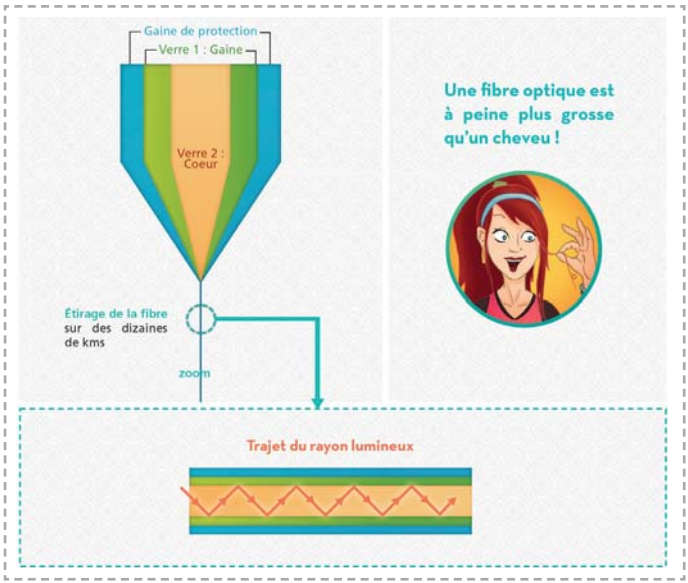
La lumière reste prisonnière du filet d'eau parce qu'elle se déplace moins vite dans l'eau que dans l'air et qu'elle est réfléchie à l'interface eau-air.

Pour que la lumière reste prisonnière dans une fibre optique, il faut donc que le cœur de la fibre joue le rôle de l'eau et la gaine celui de l'air.

Une fibre optique est un assemblage concentrique de deux verres (*Figure 7*) dans lequel la lumière circule moins vite dans la partie centrale que dans la gaine.

**Figure 7**

Constitution d'une fibre optique.



# Comment fabriquer une fibre optique ?

## La silice ultra-pure pour la transparence

Les fibres optiques comme les grains de sable sont faites de silice. Mais ces derniers ne sont pas transparents car la silice des grains de sable contient beaucoup d'impuretés. Les fibres optiques qui sont le matériau le plus transparent au monde, sont constituées de silice ultra-pure fabriquée par synthèse chimique.

Les fibres optiques sont capables de transporter les ondes lumineuses sur plusieurs dizaines de kilomètres. Cette transparence peut se comparer à la vision d'une flamme de bougie à travers une épaisseur de verre de 100 km (*Figure 8*).

**Remarque**

La silice ultra-pure contient moins de 1/1 000 000 000 % d'impureté donc moins d'une impureté par milliard d'éléments.

**Figure 8**

Transport des ondes lumineuses par la fibre optique sur plusieurs dizaines de kilomètres.

L'***indice de réfraction*** caractérise les milieux transparents pour le transport des ondes électromagnétiques. Il dépend de la vitesse de l'onde dans le milieu transparent.

**Remarque**

L'indice de réfraction pour un rayonnement donné varie avec la nature et la quantité d'élément dopant ajouté dans la silice.

## Maintenir la lumière prisonnière

Dans les fibres optiques, la gaine périphérique est en silice de synthèse ultra-pure.

Pour qu'un rayon lumineux reste prisonnier du cœur de la fibre, il faut que sa vitesse dans le coeur soit inférieure à sa vitesse dans la silice ultra-pure qui constitue la gaine.

Pour que le rayonnement reste prisonnier du tube central, il faut donc que l'indice de la silice dopée soit plus grand que celui de la silice ultra-pure qui constitue la gaine extérieure.

Pour réaliser cela, il faut ajouter des éléments dans la silice du tube central, selon un procédé appelé le dopage.

Les éléments les plus utilisés sont le germanium (Ge), l'aluminium (Al) et le fluor (F) (*Figure10*).

La fabrication d'une fibre optique se fait en deux étapes : la fabrication de la préforme en silice ultra-pure (la gaine), sur la paroi intérieure de laquelle on dépose et ajuste les quantités d'éléments dopants, puis son étirage.

## Le dopage

Le dopage est réalisé à partir d'un mélange gazeux constitué d'oxygène, de chlorure de silicium ($SiCl_4$) et de chlorure de l'élément dopant choisi, ici le chlorure de germanium ($GeCl_4$), injecté au centre du tube creux de silice ultra-pure mis en rotation et qui servira de gaine.

Un chalumeau se déplace le long du tube et chauffe le mélange de chlorures gazeux à 1 200 °C, celui-ci réagit avec l'oxygène et produit un mélange homogène de suies composé de silice $SiO_2$ et d'oxyde de germanium $GeO_2$, qui se dépose en fine couche sur la paroi interne de la gaine de silice ultra-pure. Le chlore gazeux ($Cl_2$) résultant est évacué.

Quand la température du chalumeau est ensuite élevée à 1 400 °C, le mélange se vitrifie c'est-à-dire se transforme en verre de silice transparent, mais dans lequel certains atomes de silice seront remplacés par des atomes de germanium (*Figure 9*).

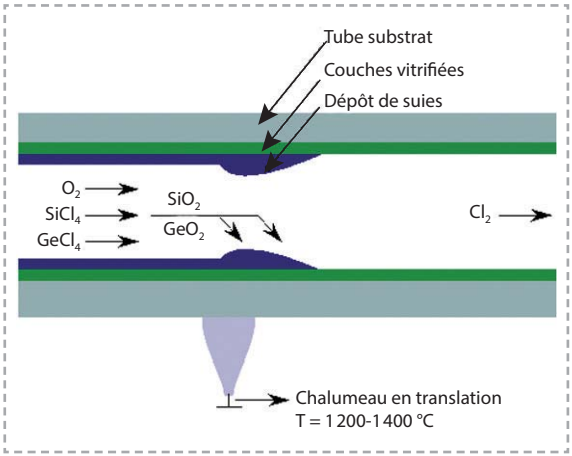



**Figure 9**

Principe du dopage de la gaine (tube) d'une fibre optique.

## L'étirage

Dans l'étape suivante (*Figure 10*), l'intérieur du tube est mis sous vide puis chauffé à 1 600 °C : il se referme (partie droite de la *Figure 10*) et on obtient un tube plein (*Figure 10*) dont le cœur est en silice dopée au germanium et la gaine en silice ultra-pure.

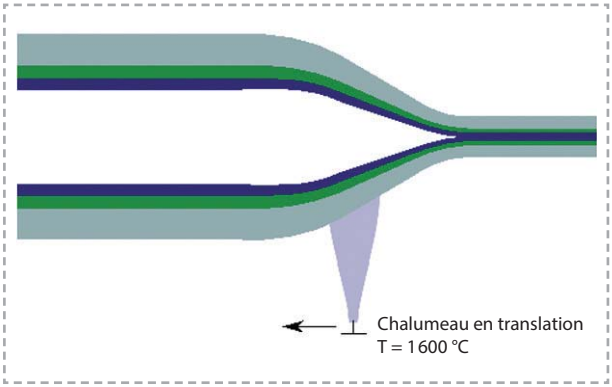



**Figure 10**

Fermeture de la gaine

**Remarque**

On contrôle, au cours du fibrage, le diamètre et la tension du fil, qui influent beaucoup sur la propagation des ondes dans la fibre ainsi que sur la déperdition.

## Le fibrage

Ce tube est ensuite étiré en fibre dans une tour de fibrage. Le tube est d'abord ramolli dans un four à 1 800 °C, puis sous l'effet de la pesanteur, il coule sous forme d'un mince fil qui constitue la fibre optique qui est ensuite enroulée sur un support appelé une recette.

# La transmission des informations : des Indiens à la fibre optique

**Figure 11**

Principe de transport par la fibre optique des impulsions de lumière codées.

## De la fumée au rayonnement laser

Il y a plusieurs siècles, les Indiens transmettaient les informations à partir de signaux de fumée découpés en petits nuages dont la taille, le nombre et la fréquence d'apparition formaient un message qui avait un sens pour l'émetteur et pour le récepteur.

Dans les communications par fibre optique, le faisceau laser remplace la fumée. Les impulsions de lumière remplacent les petits nuages de fumée, et pour le reste c'est pareil (*Figure 11*) !

Le code résulte toujours d'un accord entre l'émetteur et le récepteur.

L'Indien cherche à augmenter le nombre d'informations transmises en une seconde, c'est-à-dire le nombre de petits nuages tandis que dans la fibre optique, c'est le nombre d'impulsions de lumière en une seconde qu'il faut augmenter.

**Remarque**

Actuellement, on sait envoyer 10 milliards d'impulsions lumineuses par seconde.

## De la communication de colline en colline, à celle entre les continents

Les messages doivent être envoyés à de grandes distances. Les Indiens avaient des relais de colline en colline.
Pour les fibres optiques, c'est le même principe. La puissance du signal lumineux disparaît après une distance parcourue de 100 km, alors qu'il faut acheminer les informations au-delà des océans à des dizaines de milliers de kilomètres.
Pour cela, on remplace les Indiens en relais sur chaque colline par des amplificateurs de lumière placés sur le trajet de la fibre optique qui transporte la lumière (*Figure 12*).

Les ***amplificateurs*** de lumière sont aussi des fibres optiques mais pourvues d'éléments dopants de nature différente, de celles qui transportent la lumière.

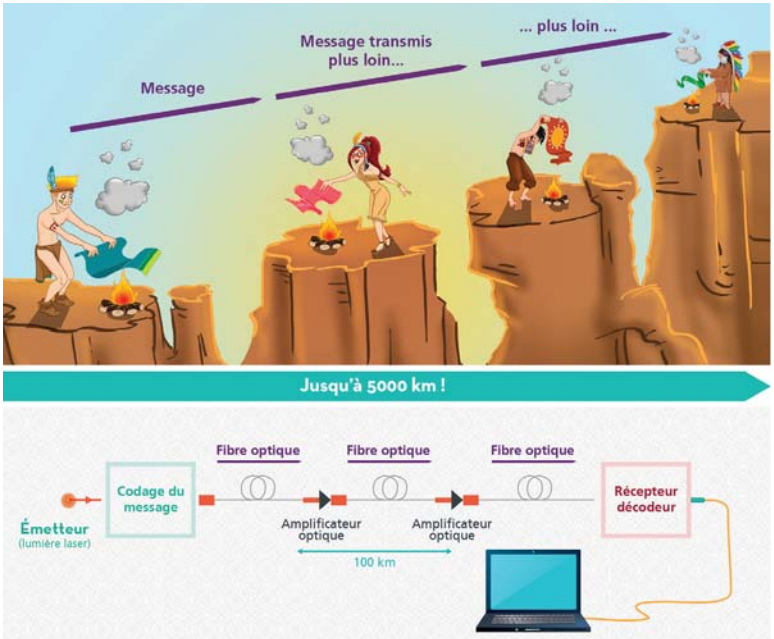



**Figure 12**

Toujours plus loin grâce aux amplificateurs optiques.

**Remarque**

On peut obtenir des gains de 1 000 en intensité, avec des fibres amplificatrices d'une longueur de 10 mètres.

L'amplificateur est une fibre optique dont la partie centrale est dopée avec des ions positifs de métaux de la famille chimique des terres rares notamment avec des ions erbium $Er^{3+}$.
Comme l'Indien, ces fibres amplificatrices restituent l'intensité du signal lumineux affaibli.

Pour véhiculer plusieurs messages à la fois, il fallait plusieurs Indiens ! Maintenant, il suffit d'une fibre optique et une fibre amplificatrice puisqu'elles peuvent transporter, simultanément, plusieurs dizaines de rayonnements laser différents, chacun apportant sa propre information (*Figure 13*).
Tout se passe comme si on injectait plusieurs couleurs dans une liaison optique, sans qu'elles se mélangent.

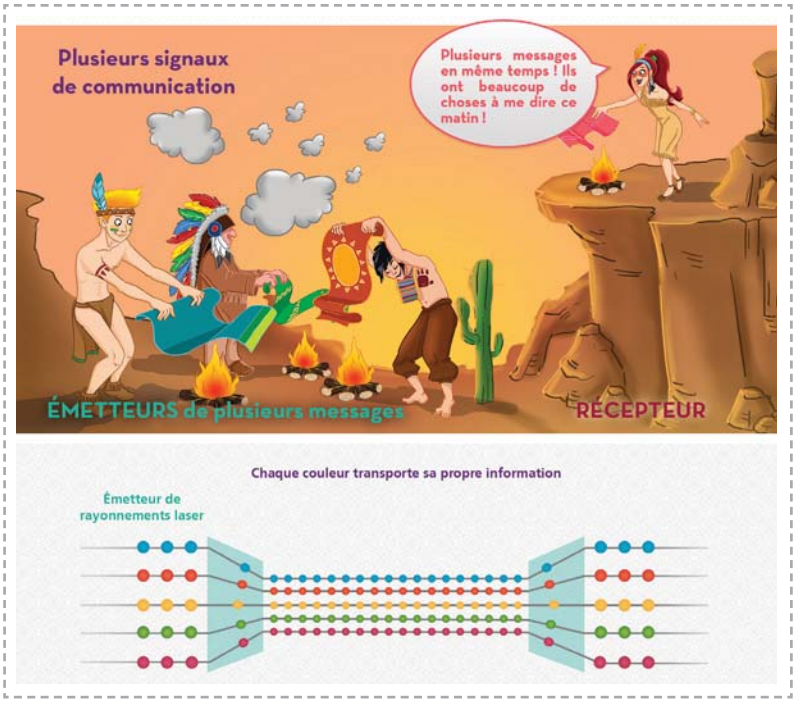



**Figure 13**

Toujours plus de messages grâce aux fibres amplificatrices (transport simultané de plusieurs dizaines de rayonnements laser).

# Des fibres optiques au réseau Internet mondial

Les fibres optiques sont très fines et très longues donc fragiles et pourtant elles doivent durer des dizaines d'années dans des conditions extrêmement difficiles : il faut donc les protéger dans des câbles.

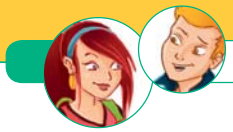
**Remarque**

Pour assurer leur longévité, il a fallu mettre au point des câbles capables de résister à la pression de l'eau au fond des océans, c'est-à-dire à la pression de colonnes d'eau de plusieurs kilomètres de hauteur et produire des milliers de kilomètres de ces câbles pour permettre le développement du réseau Internet.

La *figure 14* montre la répartition des câbles à fibre optique (traits de couleurs sur la carte) sur la planète. Pour satisfaire la demande toujours croissante, il faudrait doubler la capacité tous les 18 mois !

**Figure 14**

Répartition des nouveaux câbles à fibre optique sur la planète.



Cela coûterait trop cher, il faut donc augmenter les capacités de transmission, à savoir le nombre de messages par fibre, ou encore le nombre de rayonnements transportés.

Pour réaliser cela, les chimistes, les physiciens et les mathématiciens doivent travailler en étroite collaboration pour concevoir de nouveaux matériaux qui conduiront vers la fabrication de nouvelles fibres.

**Remarque**

En variant la nature et la quantité des éléments dopants, les fibres optiques sont maintenant capables de transporter des rayonnements lasers très différents de ceux utilisés pour Internet.

## Conclusion

### Les applications des fibres optiques aujourd'hui et demain

**On peut désormais les utiliser dans des applications aussi diverses que :**

- **sonder les puits de pétrole pour en déterminer le volume ;**
- **faire de la soudure de précision ;**
- **relever en temps réel les déformations d'un pont ou d'un barrage pour permettre, par exemple, de sécuriser les infrastructures ;**
- **générer des impulsions lumineuses géantes utilisées en microchirurgie (de l'œil par exemple) ;**
- **réaliser des images à l'intérieur du corps humain ;**
- **réaliser des lasers infrarouges mille fois plus brillants que le Soleil qui permettraient de détecter les traces d'espèces polluantes de l'atmosphère (recherches en cours).**

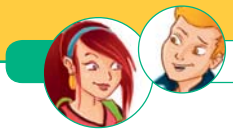
# LA CHIMIE DES ÉCRANS SOUPLES

Nos téléphones portables, nos ordinateurs ou tablettes, qu'ils soient connectés ou non, reçoivent un signal électrique, le traitent pour en extraire l'information, qu'ils mettent en forme pour en tirer une image projetée sur un écran ou un son amplifié par un haut-parleur (*figure 1*).

Les appareils électroniques fonctionnent par des courants électriques (des signaux) et sont donc fabriqués à partir de conducteurs électriques. À l'origine, c'est le silicium qui s'est imposé comme le plus adapté.

**Figure 1**

Les portables fonctionnement à partir des signaux électriques.



**Remarque**

Le silicium est un métal que l'on ne rencontre pas sous forme naturelle sur Terre. C'est un composant essentiel de roches comme le sable. C'est de là qu'il est extrait par des opérations chimiques.

Depuis quelques années, les chimistes ont synthétisé de nouveaux matériaux conducteurs de l'électricité, des matériaux organiques, qui ouvrent la voie vers d'autres équipements.

# Les matériaux organiques

Les conducteurs organiques n'ont pas les mêmes propriétés que le silicium, conducteur inorganique. Ils sont beaucoup moins rapides, donc moins adaptés aux ondes radio, mais considérablement moins coûteux. La question se pose de savoir si on peut les utiliser pour réaliser des équipements électroniques et si oui, quels types d'équipements ?

### Matériaux organiques, matériaux inorganiques

La chimie organique étudie les molécules (assemblages d'atomes liés entre eux) que l'on rencontre chez les êtres vivants. Elles sont constituées principalement d'atomes de carbone, d'oxygène, d'hydrogène qui forment un squelette et contiennent éventuellement d'autres atomes comme l'azote, le phosphore ou certains métaux qui donnent des propriétés particulières. Ces molécules organiques peuvent être arrangées sous forme de solides ou de films et constituer des matériaux : certains peuvent conduire l'électricité.

La chimie inorganique s'inspire des roches qui constituent la terre, comme le calcaire des falaises, le sable (d'où l'on tire le silicium), l'argile, etc. Ces roches sont souvent constituées de cristaux plus ou moins réguliers. Elles peuvent contenir des parties métalliques d'où l'on tire les métaux. Certains assemblages ont des propriétés intéressantes, comme de conduire l'électricité : ce sont des matériaux inorganiques conducteurs.

Dans l'industrie électronique, les matériaux organiques peuvent être utilisés comme conducteurs, semi-conducteurs, isolant ou simplement comme substrat.

## Exemples de matériaux organiques pour l'électronique

**Conducteurs polymères :**
Polyanalyline, Polypyrrole, PEDOT : PSS (mélange de deux polymères, le Poly [3,4-ÉthylèneDiOxyThiophène] et le Polystyrène Sulfonate de Sodium).

**Semi-conducteurs :**
Polymères, petites molécules, inorganique (oxyde, Si).

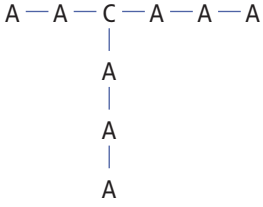
**Isolants :**
Polymères : fluorés, polyméthylmétacrylate (PMMA).

**Substrats :**
Plastiques (polyéthylène), papiers.

## Exemples de structures de polymères

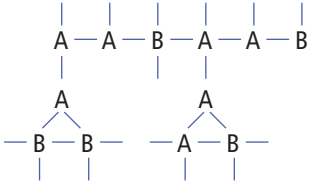
**Homopolymère linéaire :**

**Homopolymère ramifié :**




**Copolymère linéaire :**

**Copolymère réticulé :**




A, B, C sont des molécules organiques de petites tailles. L'atome qui se répète sur la chaîne principale est généralement le carbone. Les autres atomes constitutifs sont surtout, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote mais aussi le phosphore, le bore, etc.

Les ***polymères organiques*** sont de longues molécules constituées de l'enchaînement de petites molécules organiques. Ces enchaînements peuvent être de géométries très diverses comme indiqué ci-contre.

## *Conducteur, semi-conducteur de l'électricité : qu'est-ce que ça veut dire ?*

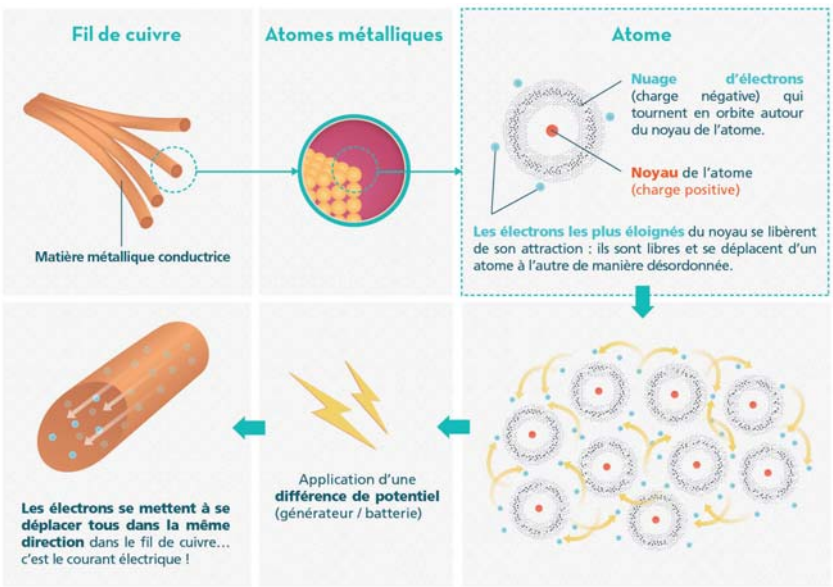
La *figure 2* montre ce qui se passe dans la matière en présence d'un courant électrique.

On prend l'exemple d'un fil de cuivre : il est constitué d'atomes de cuivre – chacun comportant un « noyau atomique » et des électrons. Comme c'est un métal, les électrons sont assez éloignés du noyau pour en être détachés par un champ électrique même faible comme une pile électrique peut en fournir. Chaque électron suit la direction de la force électrique (on dit aussi du « champ électrique) : c'est le courant électrique. **Le cuivre est « conducteur » de l'électricité**.

Pour d'autres matériaux, comme par exemple un morceau de matière plastique, les électrons restent si fortement attachés au noyau atomique qu'un champ électrique ne les arrache pas : aucun courant n'est créé : **ce sont des matériaux « isolants »**.

Il existe une troisième catégorie de matériaux, intermédiaire : **ce sont des « semi-conducteurs »**. Seuls, ce sont des isolants, mais un champ électrique, même tout petit, peut détacher les électrons ; ils deviennent alors conducteurs. Ces matériaux peuvent donc être « commandés » à la demande de l'opérateur : isolants ou conducteurs. Il suffit de les placer dans un circuit qu'on « ouvre ou ferme » par un interrupteur. C'est le principe du transistor, qu'on retrouvera au chapitre « Exploser un smartphone ». C'est le transistor, grâce à sa propriété d'être commandé, qui est à la base de tous nos appareils électroniques. Dans les circuits, il doit être fixé sur un support – qu'on appelle le substrat.

**Figure 2** Mécanisme de la conduction de l'électricité par le cuivre.



# Avantages et limites du silicium

Le silicium s'est imposé dans nos équipements électroniques parce qu'il permet le passage des courants qui correspondent à la radio ou au téléphone (courants de hautes fréquences).

Il permet aussi de construire des composants de très petites dimensions : les ingénieurs ont inventé des techniques pour réaliser cette miniaturisation impressionnante qui marque chaque nouvelle génération d'appareils.

## Appareils compacts ou appareils de grandes surfaces ?

Un simple smartphone est cent fois plus puissant que les ordinateurs de bureau des années 1980. Et les fabricants se livrent toujours à la course à la miniaturisation !

Néanmoins, le silicium ne permet pas de couvrir de grandes surfaces (des planches, murs, sols, toits) d'électronique. Toute une catégorie d'applications lui est ainsi interdite. Les matériaux organiques lui sont alors préférés.

**Remarque**

On avait, il y a quelques décennies, un transistor sur une surface d'1 mm² de silicium ; aujourd'hui, on en a plusieurs milliards !

**Figure 3**

Comparaison des propriétés des semi-conducteurs organiques et inorganiques.

Finalement, on ne choisit pas : le silicium fera la miniaturisation et les matériaux organiques les dispositifs étendus (*Figure 3*) !
Les matériaux organiques, inaptes à la miniaturisation, ne peuvent pas remplacer le silicium dans les équipements mobiles actuels (smartphones ou tablettes). En revanche, comme on peut les fabriquer en grandes surfaces (comme des tissus), on peut les utiliser pour la réalisation d'équipements, de vastes dimensions, totalement nouveaux. La *figure 4* en donne quelques exemples.

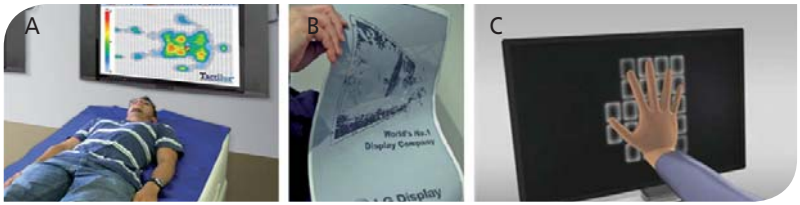



**Figure 4**

**A)** Drap pour la cartographie thermique d'un patient ;
**B)** écrans flexibles, faciles à transporter ;
**C)** interface homme-machine.

**Remarque**

La résistance des matériaux organiques (dont on peut se faire une idée à partir des feuilles de plastiques ou des tissus) permet ces applications, inaccessibles au silicium très fragile (un téléphone qui tombe peut se casser !).

# Faire des circuits électriques avec les matériaux organiques

## L'encre électronique

**Remarque**

La manipulation du silicium doit se faire en l'absence stricte de poussières. Elle se réalise donc dans des « salles blanches », en atmosphère parfaitement contrôlée et par des équipements robotisés.

Les matériaux organiques se fabriquent à des températures modérées (guère plus qu'une centaine de degrés) et ne nécessitent pas les équipements compliqués et chers de la technologie au silicium.

On peut dissoudre les molécules actives (conductrices du courant) et les manipuler comme l'encre. Ce sont des « encres » électriquement actives (*Figure 5*). On peut étaler cette encre comme on le fait avec l'encre d'imprimerie.

**Figure 5**

Différents types d'encres permettant de déposer les matériaux organiques conducteurs sur une variété de supports.

## L'imprimerie du XXIe siècle

On va imprimer les circuits électriques sur les supports choisis (films plastiques par exemple) comme dans l'imprimerie traditionnelle qui se fait sur papier depuis tant de siècles ! C'est l'électronique imprimée !

**Figure 6**

Principe de l'électronique imprimée.

On retrouve les modes d'impression habituels pour les journaux, les livres, etc. La *figure 7* montre une installation de sérigraphie utilisée pour l'imprimerie électronique. Elle ressemble exactement à une installation d'impression sur papier. Une autre technique courante est celle de l'impression « à jet d'encre », typique des imprimantes de bureau. Le choix de la technique dépend du type de travail à faire et du coût recherché.

**Figure 7**

Installation d'imprimerie pour l'électronique par sérigraphie.

Dans tous les cas, la préparation des « encres », qui sont des solutions à propriétés bien spécifiques, est réalisée par des équipes de techniciens ou chercheurs pluridisciplinaires (chimistes formulateurs [c'est-à-dire qui peuvent décider du mélange de produits à utiliser], équipementiers, électroniciens).

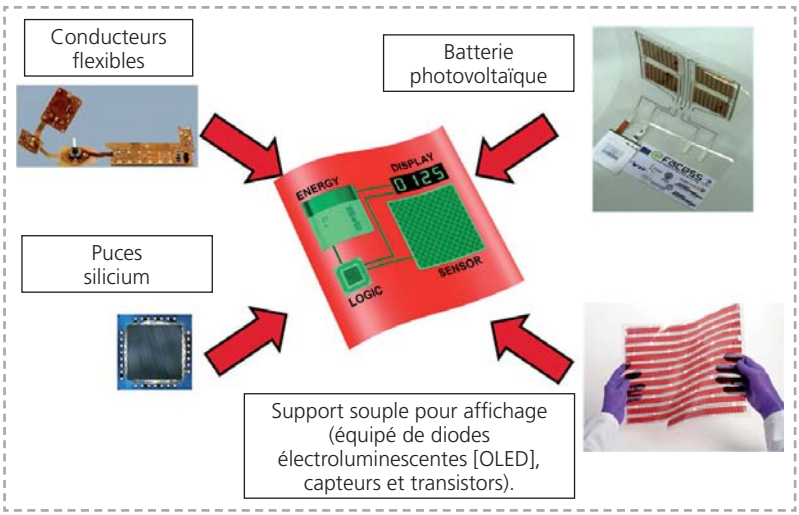
# Une nouvelle génération d'équipements

## Les réalisations d'aujourd'hui…

L'électronique organique peut utiliser sur une variété de supports – plats ou non – films plastiques, papier ou plastiques transparents, robustes, recyclables, etc. La *figure 8* montre des « conducteurs flexibles », des batteries photovoltaïques pour l'exploitation de l'énergie solaire, des « puces » au silicium à insérer sur supports souples, et des surfaces plus importantes équipées d'afficheurs ou de capteurs.

**Figure 8**

Exemples de composants réalisés en matériaux organiques pour réaliser un équipement sur écran souple.




À partir de tels composants, on peut imaginer toute sorte de nouveaux équipements. En voici quelques-uns, qui existent déjà dans les laboratoires :

– on peut équiper un tissu (un drap) de capteurs thermiques. Ils peuvent mesurer la carte des températures d'une grande surface pour tester

une installation de chauffage ou également pour des applications médicales (*Figure 4*) ;

– on peut répartir des sources de lumière sur un tissu (des LED organiques) pour réaliser un éclairage étendu et créer une ambiance lumineuse confortable ;

– on peut équiper une grande surface de capteurs de rayonnement du Soleil (capteurs photovoltaïques) pour réaliser une installation de production d'énergie sur une surface courbe (un toit aux formes compliquées ou une tente de camping) (*Figure 9*).

**Figure 9**

L'installation de cellules photovoltaïques sur supports souples en multiplie les utilisations possibles. Ici, on les utilise sur des tentes de camping pour recharger des batteries.

## … et celles de demain

Les possibilités du silicium et celles des composants organiques sont différentes et complémentaires. On voudrait bien les marier en mettant au point ce que l'on appelle des systèmes hybrides-organiques plus silicium (*Figure 10*).

**Figure 10**

Le mariage du silicium et des composants organiques : la voie du futur.

**Figure 11**

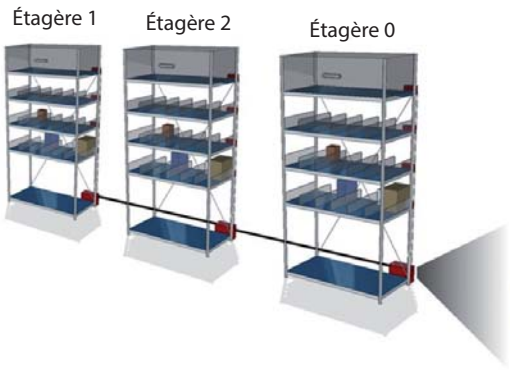
Écran de liseuse sur support souple réalisé par intégration hybride silicium + organique.

Des mesures (température, détection d'objets, luminosité ) seraient faites par des capteurs et reçues par des surfaces organiques activées. Les résultats, utilisés pour la commande d'équipements, l'affichage en temps réel, leur mise en mémoire des résultats, leur partage et leur traitement seraient traités par des composants au silicium mieux adaptés et directement insérés sur les supports plastiques actifs (*Figure 11*).

**Figure 12**

Équipement d'un système d'étagères par des détecteurs électroniques du stock présenté.

Agencement du système




Des étagères capables de suivre les stocks dans les magasins sont déjà en cours de réalisation (*Figure 12*). Il existe aussi des dispositifs d'imagerie médicale transportables, des piluliers intelligents (qui indiquent les pilules à prendre et leur réserve disponible).

## Conclusion

**La chimie des matériaux inorganiques (métaux ou semi-conducteurs) a donné, il y a déjà longtemps, naissance à l'électronique. Au cours des dernières décennies, elle a permis l'apparition des équipements de communication actuels.**

**La chimie organique apporte, aujourd'hui, de nouvelles possibilités en permettant d'équiper de grandes surfaces. Les nouveaux équipements en préparation, grâce à son utilisation, ne tarderont pas à envahir notre vie quotidienne !**

# VIE ET RECYCLAGE DES APPAREILS ET SUPPORTS NUMÉRIQUES

Que deviennent tous nos appareils périmés ? Chaque année en France, on vend plusieurs millions de tablettes, ordinateurs, smartphones. Et l'utilisation d'Internet continue à augmenter… Ces appareils se démodent vite, en quelques années au plus. Alors que deviennent-ils quand ils n'intéressent plus d'utilisateurs ?

Une partie est renvoyée chez les fabricants ; réparés, ils retournent dans le commerce. Mais la plus grande partie est purement et simplement « jetée » (*Figure 1*). C'est un gaspillage gigantesque !

**Remarque**

L'indium et les terres rares sont des métaux rares mais indispensables à nos appareils actuels.

**Figure 1**

Vite démodés ou dépassés, de nombreux téléphones, tablettes et ordinateurs rejoignent chaque année les tonnes de déchets.

Les appareils électroniques sont des objets compliqués, ils contiennent de nombreux matériaux et en particulier des métaux rares qu'il a fallu approvisionner avec beaucoup d'efforts (l'extraction des minerais est très difficile) et énormément d'argent.

Il est donc important d'être capable de récupérer ces métaux des vieux appareils et de les réutiliser : on dit « les recycler » (*Figure 2*).

**Figure 2**

Porteurs de nombreux matériaux rares et précieux, le recyclage de ces appareils s'impose.

# La pénurie de ressources minérales

***Les ressources*** sont les quantités disponibles des éléments recherchés : le nombre et la dimension des réserves minières par exemple.

La consommation d'un si grand nombre d'appareils électroniques pose une question : y aura-t-il sur la Terre des quantités suffisantes d'éléments nécessaires comme les métaux précieux ou le silicium ?

Puisque les ressources sont limitées – tout comme la planète – on doit exploiter les éléments issus du recyclage des appareils usés comme « une nouvelle ressource ». Ceci se fait encore trop peu à l'heure actuelle mais va devenir indispensable en raison de la croissance mondiale.

On pourrait souhaiter, comme certains, que la croissance s'arrête pour éviter la question des ressources. Mais c'est le point de vue d'une toute petite minorité de gens car personne ne veut vraiment limiter son utilisation des appareils. D'autres proposent de modifier la gestion des appareils pour consommer moins de ressources. Ils mettent par exemple en avant l'éco-conception.

### *L'éco-conception*

Cela consiste à choisir les composants des appareils, non plus uniquement en raison de leur faible coût, mais en tenant compte aussi que les matériaux choisis occasionnent le moins de dommages possible à l'environnement – par exemple, en évitant de surexploiter les ressources les plus rares. Il peut en résulter des appareils un peu plus coûteux ou un peu moins maniables, mais permet de continuer leur fabrication sur un plus long terme.

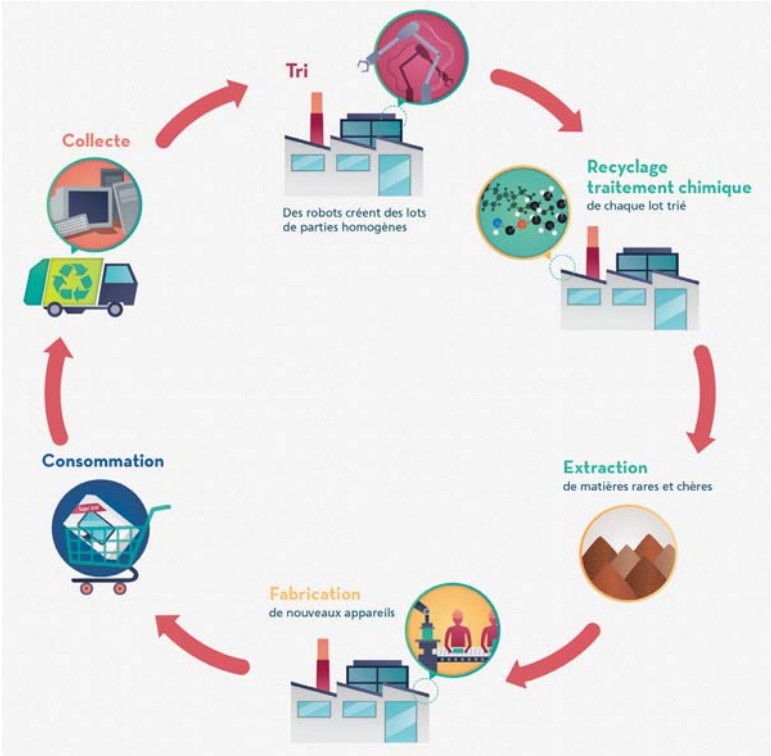
# *La gestion des déchets*

On produit 600 millions de tonnes de déchets par an en France et on ne peut pas tout simplement les stocker sur le sol ou les enterrer parce qu'ils pourraient polluer et dégrader l'environnement. On doit donc les détruire (incinération) ou les réutiliser.

Depuis les années 1990, on a installé l'obligation du tri des déchets pour pouvoir les traiter en fonction de leur nature et en extraire les ressources qui y restent contenues – c'est le recyclage qui a le double avantage d'éviter la pollution qui se développerait si on laissait les déchets bruts dégrader l'environnement, et limiter le recours à des ressources naturelles trop rares (*Figure 3*).

**Figure 3**

Les vieux appareils mis au rebut doivent être collectés, puis triés et démantelés. Après séparation chimique, on en récupère les matières précieuses pour les réutiliser. Ceci épargne des ressources minérales qui seront de plus en plus rares et chères : c'est le recyclage.




Le recyclage est une activité industrielle lourde de par les quantités gigantesques qu'elle doit traiter. Le déchet doit d'abord être trié soigneusement pour rassembler les parties analogues, puis chaque lot doit être traité chimiquement afin de recueillir, aussi complètement que possible, les éléments recherchés (voir encart : l'exemple des écrans plats).

**Remarque**

Toutes les étapes industrielles (collecte, tri et traitement des déchets) ne sont pas faites dans la même usine. Les opérations, très différentes les unes des autres, requièrent souvent des installations séparées.

**Remarque**

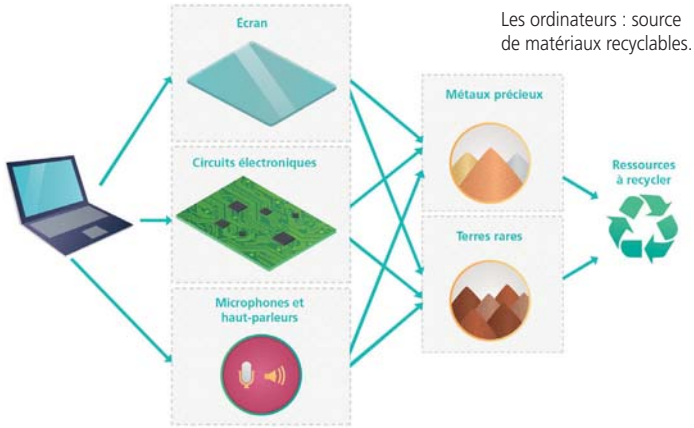
On peut extraire des déchets, non seulement les éléments ou les produits chimiques mais aussi l'énergie. Ils sont fréquemment incinérés pour chauffer des locaux industriels. Aujourd'hui, en France, l'incinération des déchets produit plus d'énergie que le solaire et l'éolien réunis.

## L'exemple des écrans plats

Les écrans plats collectés en France sont traités dans une usine spécialement construite pour cela. Ils y sont démantelés par des robots, les aimants sont séparés, le reste est broyé et traité pour la récupération du verre. Les métaux stratégiques (l'indium ou les terres rares comme le néodyme) qui constituent les pigments produisant les couleurs, sont récupérés des couches sensibles déposées sur le verre (*Figure 4*). Ils sont ensuite réutilisés dans les usines de fabrication de nouveaux appareils.

**Figure 4**

Les ordinateurs : source de matériaux recyclables.




# La sauvegarde des données numériques

Jusqu'à maintenant, tous les documents, qu'ils soient personnels (photos, lettres), administratifs ou professionnels étaient produits sur papier et pouvaient se conserver sur des durées extrêmement longues (des siècles). Ils sont désormais de plus en plus créés par ordinateurs et conservés sur des supports numériques (disques durs, DVD). Mais quelle est la réelle durée de cette conservation ?

**Remarque**

Les supports numériques les plus répandus dans tous les publics sont les DVD (disque optique réenregistrable).

**Figure 5**

Extrait d'une publicité des années 2000 et de ses allégations : « Enregistrer pour l'éternité ! » (www.philips.com/dvdr)

Les fabricants prétendent souvent que ces supports ont des durées de vie très longues (plusieurs décennies, voire siècles) (*Figure 5*) mais on observe qu'il n'en est rien ! On voit apparaître des traces de détérioration des disques, conservés dans des conditions standards, au terme d'un beaucoup plus petit nombre d'années (par exemple une décennie) (*Figure 6*).

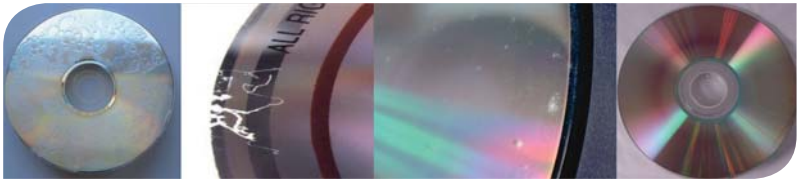


**Figure 6**

Traces de détérioration observées sur des disques (CD), conservés dans des conditions standards, pendant quelques années. On observe des délitements des couches par diffusion des molécules d'eau, des moisissures, des cloques…

## Tester la résistance des supports au vieillissement

Des recherches ont été lancées sur les mécanismes du vieillissement des supports ; elles pourraient permettre d'inventer des supports plus résistants que les DVD actuels. Les études utilisent des installations de « vieillissement accéléré » en laboratoire (voir encart : le vieillissement accéléré) (*Figure 7*).

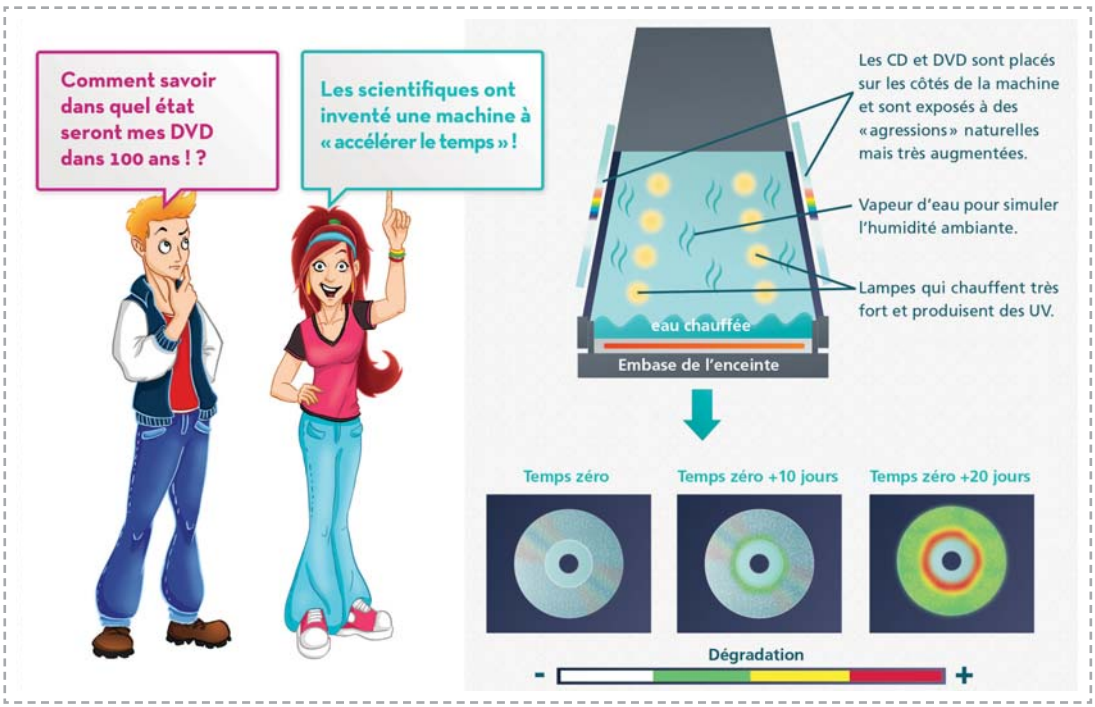
## Le vieillissement accéléré

Les durées de conservation considérées sont trop importantes (années, décennies, voire siècles) pour que les études des mécanismes puissent être faites « en temps réel ».

On utilise des chambres d'expérimentation imposant des conditions plus difficiles que les conditions naturelles. Par exemple, une température de 80 °C au lieu de 20 °C, ou encore l'introduction d'éléments corrosifs dans la chambre, ou de vapeur d'eau en excès. Conduites paramètre par paramètre, ces études permettent de cerner les mécanismes du vieillissement. La transposition des temps « en accéléré » aux temps « naturels » est une étape importante. On peut s'aider d'études faites dans les deux conditions (si elles ne mettent pas en jeu des temps trop longs) ou encore de la modélisation des réactions de dégradation par des calculs faits sur ordinateurs (simulation).

**Figure 7**

Pour mesurer la dégradation dans le temps des supports de données, les chimistes mis au point des installations de « vieillissement accéléré » en laboratoire.



On constate dans des cas standards – que des archives sont devenues inexploitables en une dizaine d'années – les disques sont devenus très inhomogènes (*Figure 6*). On ne peut donc se reposer simplement sur eux pour la conservation à long terme. On doit de ce fait recourir à des méthodes de conservation (voir encart « conservation des données par archivage actif »).

### *Conservation des données par archivage actif*

Une solution est de recopier les informations périodiquement avant que les supports ne soient détériorés. C'est la stratégie de la « recopie éternelle ». On recopie le DVD sur un support neuf, chaque fois que l'on constate une faiblesse. En pratique, il faut le faire tous les deux ou trois ans. Dans les institutions importantes (centres de gestion des données), cela peut être fait automatiquement (robots).
Cette stratégie est évidemment très coûteuse.

## Le « disque en verre »

***Le verre trempé*** est un verre d'une très grande résistance, obtenue par le passage rapide de haute à basse température au cours de la fabrication.

Il existe cependant un support de qualité qui a été conçu au cours des recherches : c'est le « disque en verre ». On dépose un film de résine sur un disque de verre « trempé ».

On grave les informations au laser sur la résine. On les transfère ensuite sur le verre par une technique de gravure puis on élimine chimiquement les restes de résine. On protège enfin le dispositif en le recouvrant par un placage de métal et une couche de matière plastique.

Le disque peut être lu sur des lecteurs de DVD classiques. Il passe tous les tests de longévité et pourrait conserver les informations sur des durées de plusieurs siècles (*Figure 8*). Les inconvénients de cette solution sont une faible capacité de stockage (5 Go) qui conduit à des volumes archivés encombrants et le prix du composant qui reste très élevé (150 € le DVD). D'après une étude économique, cette solution serait toutefois la plus avantageuse sur des durées de plusieurs dizaines d'années.

**Figure 8**

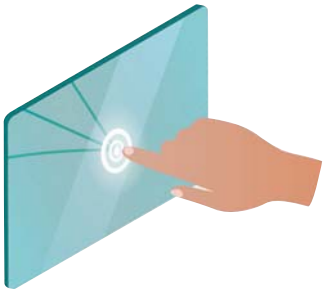
Un nouveau support de données fiable sur la durée : le disque en verre.

## Conclusion

**Face à l'épuisement progressif des ressources minérales et aux problèmes de pérennité de nos données numériques, de nouvelles activités industrielles importantes vont apparaître : la création d'une filière industrielle du recyclage d'une part et des centres de gestion des données numériques d'autre part.**

2 PARTIE

# LE HIGH-TECH : UN CONDENSÉ DE CHIMIE



# « EXPLOSER » UN SMARTPHONE

Le smartphone est devenu aujourd'hui un élément indispensable à notre vie quotidienne. Loin d'avoir l'unique fonction de téléphoner, nous pouvons désormais l'utiliser également pour prendre des photos, des films, surfer sur Internet. Mais avons-nous l'idée de la complexité d'un tel objet ?

Si à l'occasion d'une chute, il se casse et s'ouvre, nous pouvons constater qu'il est composé de plusieurs étages comme un mille-feuille compliqué (*Figure 1*).

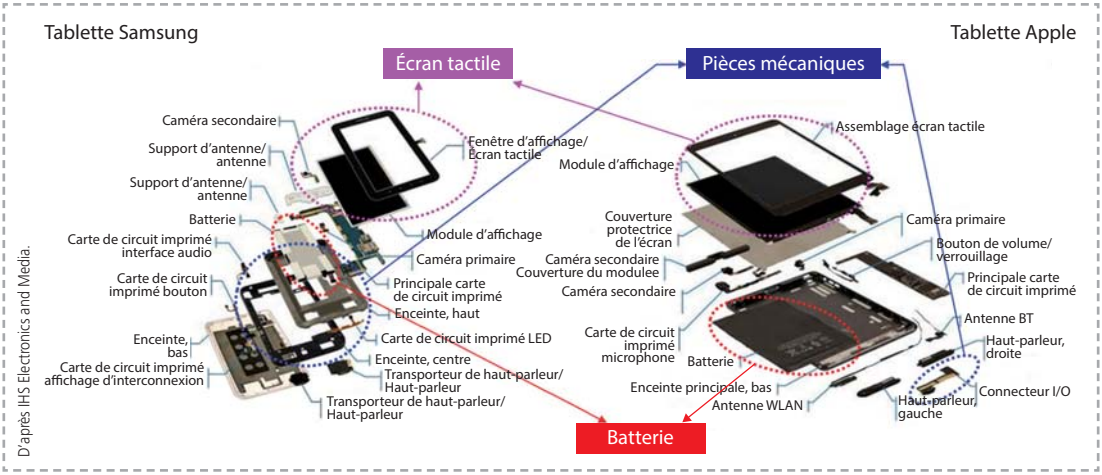



**Figure 1**

Vues éclatées d'une tablette Samsung Galaxy (à gauche) et d'une tablette Apple iPad Mini (à droite).
Oups !
Que c'est compliqué…

## *Le mille-feuille*

Lorsque l'on regarde de plus près l'intérieur d'un smartphone, voilà ce qu'on y trouve :

1. l'écran : on l'appelle écran tactile car, quand je le touche avec mon doigt, je peux faire bouger l'image et le texte ;

2. le module d'affichage : avec des transistors, des filtres de couleur et des petites lampes appelées des diodes électroluminescentes (LED) qui éclairent des millions de pixels et vont composer l'image et le texte, exactement comme sur un téléviseur ;
3. les cartes de circuits imprimés : sur lesquelles sont soudés des circuits intégrés et processeurs, véritables cerveaux du smartphone car ils sont faits de milliers de transistors. Ces transistors contiennent les « puces » qui commandent toutes les fonctions de votre appareil. La réception des appels de vos copains et copines, les circuits mémoires où vous stockez les numéros de tous vos amis, les circuits logiques qui traduisent en signaux ce que vous écrivez ou ce que vous photographiez, etc. ;
4. la batterie : pour que tout l'ensemble puisse fonctionner, il faut du courant électrique, il y a donc une réserve d'électricité avec un emplacement réservé. Cette batterie, plate, doit être chargée régulièrement à l'aide d'un chargeur ;
5. la coque : bien solide, en plastique et aluminium voire même parfois en composite carbone dans laquelle le tout est enchâssé.

**Remarque**

Les pixels sont de très petits points.

Voyons maintenant en détail ces différents étages et comment ils fonctionnent.

# L'affichage

Pour fabriquer une image sur l'écran d'un smartphone, on applique le même principe et les mêmes systèmes que pour une image de télévision haute définition. La lumière provient de petites diodes électroluminescentes, les LED.

Dans un écran LCD, avant de passer à travers des filtres colorés rouge, vert, bleu, la lumière générée par ces diodes est polarisée, c'est-à-dire que ses constituants ont pris une orientation, une direction bien précise (*Figure 2*).

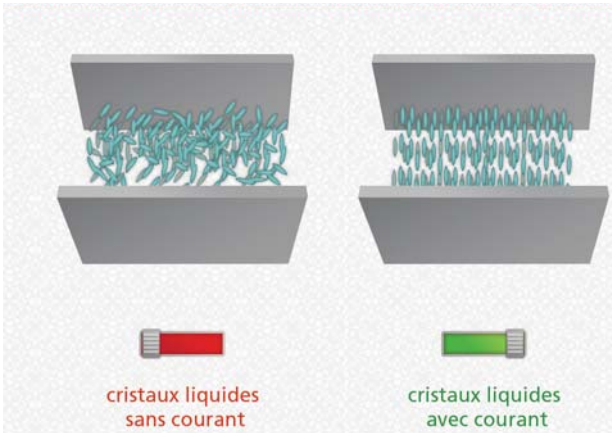
Ceci est possible grâce à des cristaux liquides. Seuls les constituants de la lumière orientés dans la même direction que les cristaux liquides peuvent les traverser. Dans le cas inverse, la lumière ne passe pas.

**Remarque**

On voit apparaître de plus en plus, pour l'éclairage de nos maisons, les lampes LED à faible consommation d'énergie comme par exemple certaines guirlandes de Noël.

**Figure 2**

Orientation des cristaux liquides lorsque l'on applique un courant.




***Les cristaux liquides*** sont de petites molécules de polymères (sous forme de bâtons ou d'hélices) qui s'alignent sous l'influence d'un champ électrique.

**Remarque**

Les trois couleurs rouge, vert et bleu sont dites fondamentales.

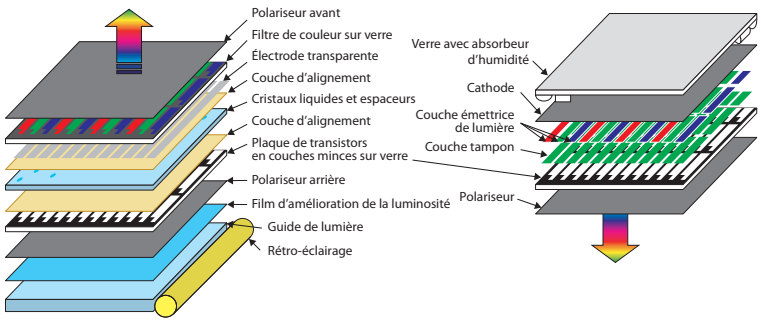
Le champ électrique, appliqué aux cristaux liquides, est généré par un petit transistor déposé en couche mince sur une plaque de verre et qui va définir la couleur des pixels (les petits points qui composent l'image).

Tous ces dispositifs constituent une magnifique machine car il faut savoir qu'un écran haute définition compte deux millions de points constitués à chaque fois des trois couleurs, réunissant six millions de pixels qui doivent fonctionner sans aucun défaut (*Figure 3*) !

Revenons un peu sur quelques définitions et termes que nous avons employés.

**Figure 3**

Schéma d'une vue éclatée d'un écran LCD (A) et d'un écran OLED (B).



## Le transistor

***Un transistor*** est un cristal de silicium très pur, dopé par des impuretés à très faibles concentrations comme par exemple du phosphore ou du gallium.

Un transistor est un composé électronique comportant des zones où dominent des charges négatives (-) et d'autres, des charges positives (+). On définit alors trois domaines à l'échelle microscopique : la source, la grille et le drain.

Si aucune tension n'est appliquée à la grille, aucun courant ne passe entre la source et le drain.

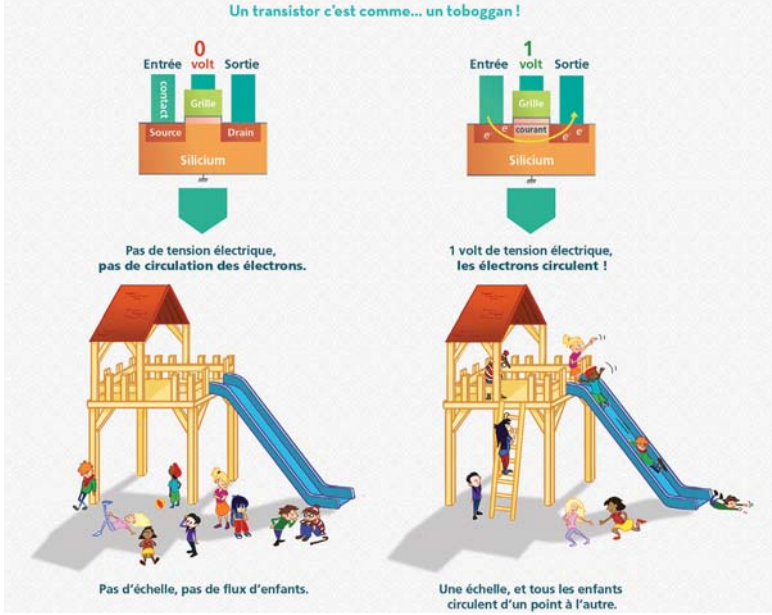



**Figure 4**

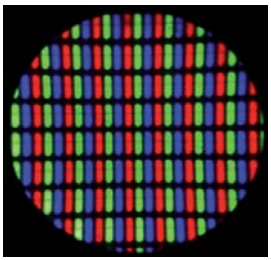
Le transistor : pour qu'il y ait déplacement des électrons, il faut que le courant passe. Pas d'échelle au toboggan, pas de descente !

Si on applique une tension d'un volt, alors le courant passe. On voit que grâce à un signal d'un volt sur la grille, on a constitué un interrupteur commandé à distance, ouvert ou fermé ! C'est lui qui sert à appliquer une tension pour faire passer ou bloquer la lumière sur le pixel (*Figure 4*).

Les transistors sont maintenant de taille de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres (environ 10 000 fois moins que l'épaisseur d'un cheveu !) pour pouvoir en placer quelques millions sur la surface de l'écran du smartphone (*Figure 5*).

**Figure 5**

Le zoom sur un écran fait apparaître des pixels. Source : BASF.



**Remarque**

Une lumière blanche est par exemple celle d'une lampe de bureau.

# Les filtres de couleur

La lumière blanche, passée dans le polariseur, traverse ensuite la couche de cristaux liquides qui peuvent changer complètement d'orientation ou s'aligner suivant une direction particulière et changer le plan de polarisation.

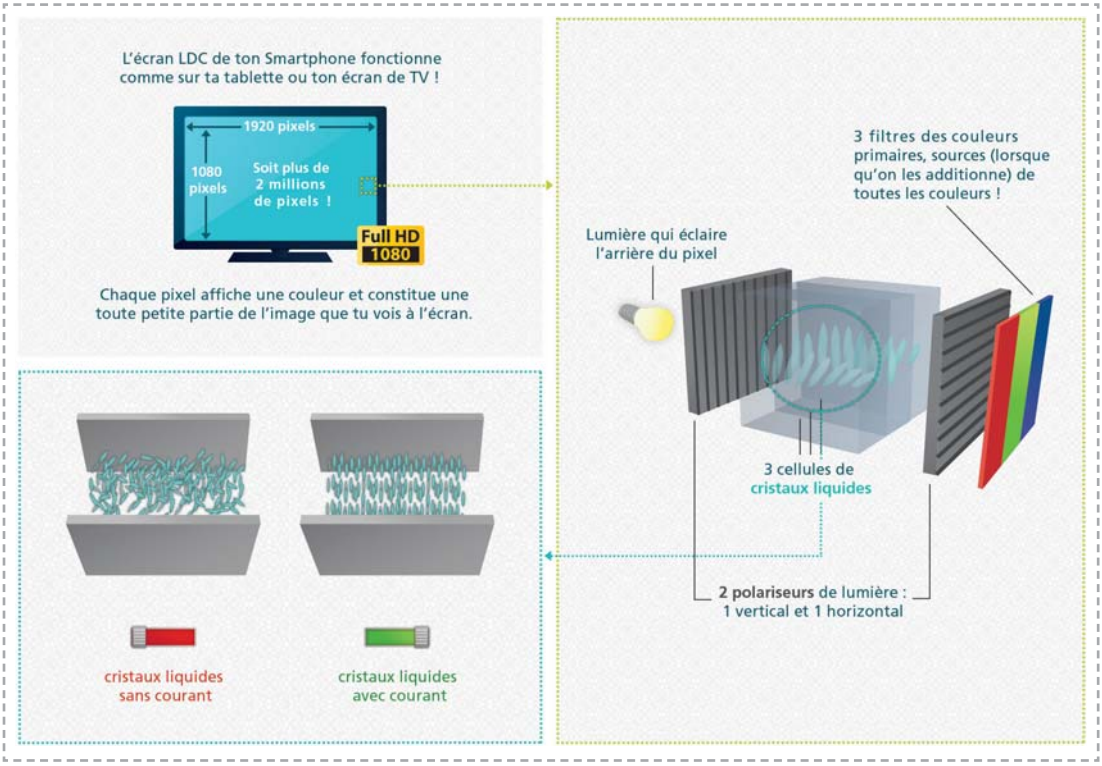



**Figure 6**

Fonctionnement de l'écran.

Examinons la *figure 6* : la lumière a traversé le filtre de couleur rouge. Si le second polariseur a un plan de polarisation parallèle à celui du premier de la lumière rouge, le faisceau peut passer et le pixel rouge est allumé. Si un courant électrique est appliqué à la couche de cristaux liquides, alors ceux-ci s'alignent suivant le plan du premier polariseur et la polarisation n'est plus changée. Lors de son passage, la lumière est toujours rouge mais son plan de polarisation est perpendiculaire à celui du second polariseur. La lumière ne passe alors pas et le pixel rouge s'éteint.

## Où la chimie intervient-elle ?

La chimie est essentielle d'abord pour synthétiser les cristaux liquides smectiques ou cholestériques, puis aussi pour fabriquer les pigments rouges, bleus ou verts, avec des grains très petits et dispersés. On dit alors qu'ils sont « micronisés » car ils apportent un meilleur contrôle des couleurs.

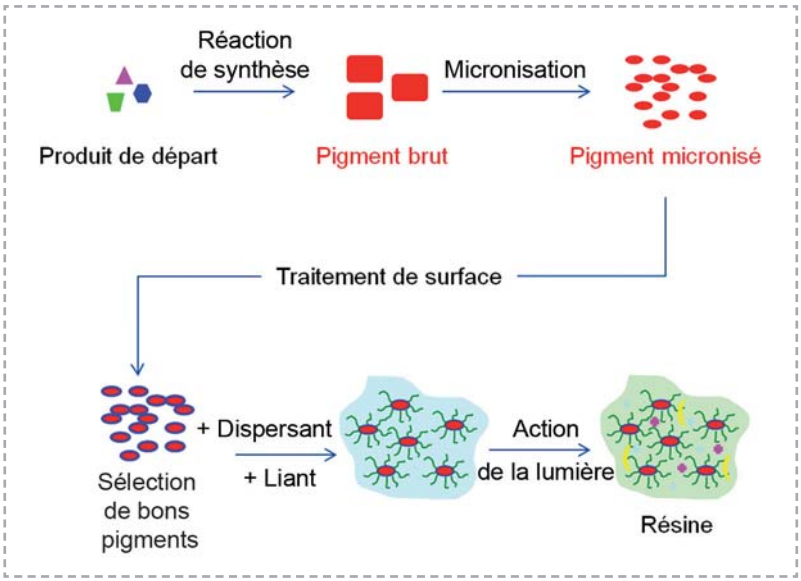



**Figure 7**

Schéma des différentes étapes de synthèse de la résine pour filtre coloré.
Source : BASF.

## Les OLED

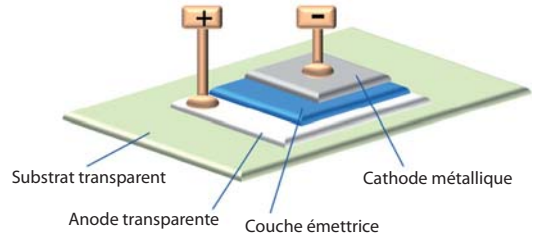
Une nouvelle technologie d'affichage qui simplifie les montages est celle des OLED (*Organic Light Emitting Diode*). Elle a d'abord été utilisée par Samsung et permet de remplacer les filtres par des émetteurs directs de couleur. En effet, chaque petit pixel va émettre sa propre lumière et donc sa propre couleur, rouge, vert ou bleu.

**Remarque**

Les couches de cristaux liquides, les filtres ainsi que les transistors de commande ne sont plus nécessaires d'où un gain de place évident et un smartphone plus fin.

**Figure 8**

Schéma d'un pixel OLED.




Sur un substrat transparent en plastique ou en verre mais qui peut être flexible, est déposée une couche conductrice de l'anode transparente à base de dioxyde d'étain ($SnO_2$) et d'oxyde d'indium $In_2O_3$. On superpose la couche organique émettrice et une couche métallique pour la cathode (*Figure 8*). Quand la différence de potentiel s'établit entre l'anode et la cathode, le pixel s'allume. Pour la télévision haute définition, les OLED coûtent encore trop cher mais ils s'imposent progressivement pour les smartphones et les tablettes.

## L'écran tactile

**Remarque**

Pas de gants pour utiliser un écran tactile ! En effet les textiles ne sont pas conducteurs contrairement à la peau.

Lorsque l'on pose le doigt sur l'écran, on déclenche un signal et cela peut soit ouvrir une fonction soit pointer et faire bouger une image, soit encore appuyer sur une lettre du pavé tactile. Le smartphone interagit avec l'utilisateur. Cela veut dire qu'en dessous de la plaque de verre ou de plastique du smartphone et au-dessus des LED, il existe un réseau quadrillé conducteur. Ce dernier est constitué de lignes et de colonnes conductrices séparées par des carrés isolants et qui dessinent une sorte de feuille quadrillée de cahier (*Figure 9*).

***ITO :*** Indium Tin Oxide (en français oxyde d'indium et d'étain).

Quand on touche la surface, le champ électromagnétique créé par ce quadrillage est perturbé. Comme les carrés sont petits, la position du doigt est facilement repérée avec précision et l'information est envoyée à l'interface électronique. Pour le réseau X/Y quadrillé, on utilise un matériau qui doit être conducteur et transparent. Le plus utilisé actuellement est un revêtement ITO en couche mince composé d'oxyde d'étain ($SnO_2$) mixte substitué à l'oxyde d'indium ($In_2O_3$) mais il reste fragile et ne supporte pas de déformation. Actuellement, on développe des polymères conducteurs et aussi des nanofils d'argent bon conducteur qui gardent 90 % de la transparence même si l'argent massif ne possède pas cette propriété.

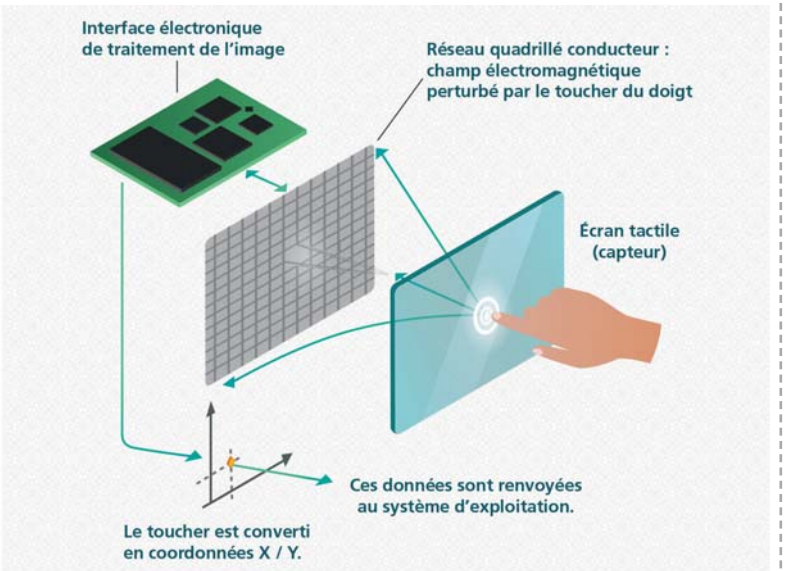



**Figure 9**

Cheminement du signal provoqué par l'appui d'un doigt sur l'écran.

# La batterie

C'est le réservoir d'énergie pour le smartphone. Elle se décharge en plusieurs heures ou plusieurs jours en fonction de l'utilisation. On y adjoint souvent un supercondensateur qui peut faire face aux pics de consommation et suppléer la batterie. Le lecteur pourra se référer au chapitre « Stocker l'énergie pour communiquer » présentant la technologie sous-jacente aux batteries.

## Conclusion

**Dans un smartphone, la chimie est présente à toutes les étapes : le silicium ultra pur dans les transistors, les polymères et les colorants organiques sur l'écran, les oxydes d'étain et d'idium sur les surfaces. Par ailleurs, sans électrochimie la batterie ion lithium ne fournirait pas de courant électrique pour le faire marcher.**

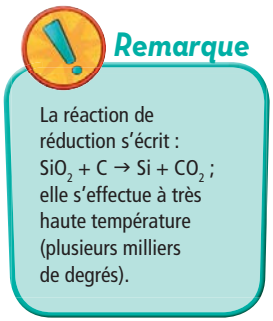
# TOUJOURS PLUS PETIT !

Un smartphone comporte des circuits intégrés qui sont composés de millions de transistors. Ces transistors sont capables de capter et de transformer les signaux électriques en chiffres, en lettres, en mots, en couleurs et en images. Pour en arriver là, il a fallu des années de recherche et de mises au point avec de nouvelles technologies où la chimie a joué un rôle important. Découvrons la saga du circuit intégré et du micro-processeur, du premier transistor à nos jours.

## *Le silicium, un cristal magique*

La plupart des semi-conducteurs sont à base de silicium. Le cristal de silicium est de forme cubique avec la structure du diamant qui est une phase très dure du carbone.

Pour fabriquer des transistors, on utilise du silicium ultra-pur afin de pouvoir le doper avec des traces d'impuretés bien choisies qui lui donneront les propriétés électroniques d'un semi-conducteur (voir aussi le chapitre « Exploser un smartphone »).




### La chimie du silicium

La matière première du silicium est la silice, c'est-à-dire du sable de formule $SiO_2$.

Dans un grand creuset, on mélange le sable ($SiO_2$) avec du charbon (C) très pur et on chauffe l'ensemble grâce à des électrodes

## L'atome de silicium

Dans ce cube, les atomes de silicium sont toujours entourés de quatre voisins et dessinent un magnifique réseau de tétraèdres. Comme le silicium a quatre électrons sur sa couche externe, il les échange avec ses voisins pour faire quatre liaisons bien fortes (*Figure 1*).

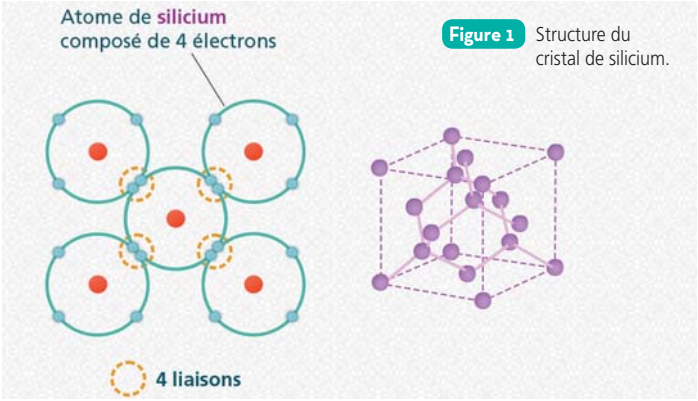



**Figure 1** Structure du cristal de silicium.

***Les électrons externes*** (ou périphériques) sont les électrons les plus éloignés du noyau dans un atome.

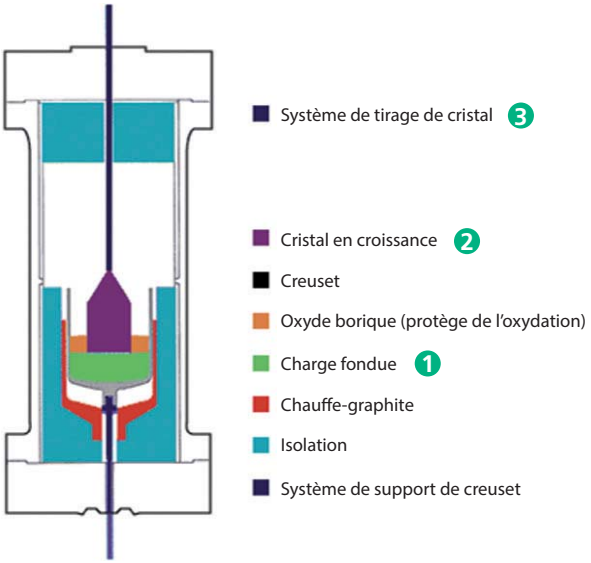
en carbone qui font passer un très fort courant. Le silicium fondu s'écoule, il est purifié à l'oxygène qui brûle ses impuretés. Après solidification sous forme de lingots ou de petites billes, on dispose d'un silicium pur à 99 %. Cependant, pour obtenir la qualité électronique ultra-pure à 99,999 999 %, il faut passer par des dérivés chlorés tels que le trichlorosilane ($SiHCl_3$) ou le tétrachorosilane ($SiCl_4$) qui sont liquides et peuvent être purifiés par distillation.

Après décomposition des chlorures à une température d'environ 900 °C, le silicium est très pur mais on doit encore lui faire subir une transformation : la cristallisation. On plonge dans un bain de silicium fondu à 1 500 °C (sur la *Figure 2*) ❶ un germe cristallisé d'où on tire, progressivement, un monocristal ❷ que l'on refroidit en l'étirant ❸. On obtient alors un monocristal de silicium qui peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres de diamètre.

La ***distillation*** permet de séparer plusieurs liquides qui ont des points d'ébullition différents (exemple l'eau et l'alcool pour faire le cognac à partir du vin, à consommer avec modération).

**Figure 2**

Système utilisé pour obtenir un monocristal de silicium.




Le monocristal est ensuite découpé en très fines galettes de 0,2 mm avec une scie circulaire diamantée. La galette est alors polie avec du carbure de silicium (SiC) puis avec un mélange de fluorure d'hydrogène (HF) et d'acide nitrique ($NO_3H$) en finition. Après rinçage, les « wafers » sont prêts pour l'implantation de transistors et de circuits intégrés.

Un ***wafer*** est un dique fin de silicium ultra pur poli et nettoyé sur lequel vont être implantés les millions de transistors.

## Le silicium semi-conducteur

On a vu dans la structure du cristal de silicium qu'il était composé de tétraèdres d'atomes de silicium très liés et bien stables ; chaque atome de Si échange avec ses voisins silicium ses quatre électrons. Si dans ce silicium ultra-pur, on introduit des traces d'impuretés, suivant leurs structures électroniques, elles vont changer ses propriétés électriques.

Si on remplace un atome de silicium Si par un atome de phosphore P (cinq électrons périphériques), ce dernier va échanger quatre électrons avec ses quatre voisins mais il en restera un de trop qui sera libre et pourra sauter le gap d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction. Si les porteurs de charges sont les électrons (charges négatives), on parlera d'un semi-conducteur de type N (*Figure 3*).

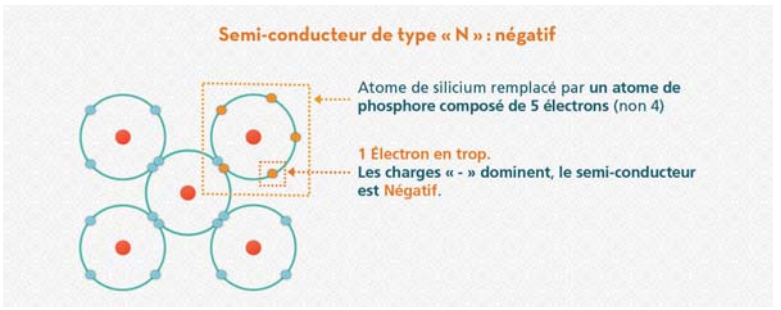



**Figure 3**

Effet sur les propriétés électriques du cristal de silicium, de l'introduction d'un atome de phosphore.

Si on remplace un atome de silicium par un atome de gallium qui n'a que trois électrons sur sa couche externe, nous sommes dans le cas contraire et il va manquer un électron. Ce manque est un « trou » qu'il va falloir compenser par une charge positive (+) dominante : on parle alors de semi-conducteur de type P (*Figure 4*).

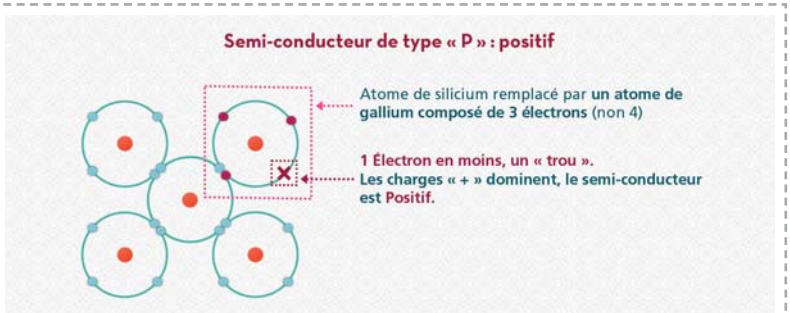



**Figure 4**

Effet sur les propriétés électriques du cristal de silicium, de l'introduction d'un atome de gallium.

Les échanges électrons/trous à travers un gap d'énergie produisent un courant si on vient perturber l'équilibre du semi-conducteur.

# Le transistor comme interrupteur ?

Vous avez sûrement vu des régiments d'hirondelles bien serrées sur des fils électriques. Imaginons deux populations sur deux fils séparés de 20 centimètres (*Figure 5*).

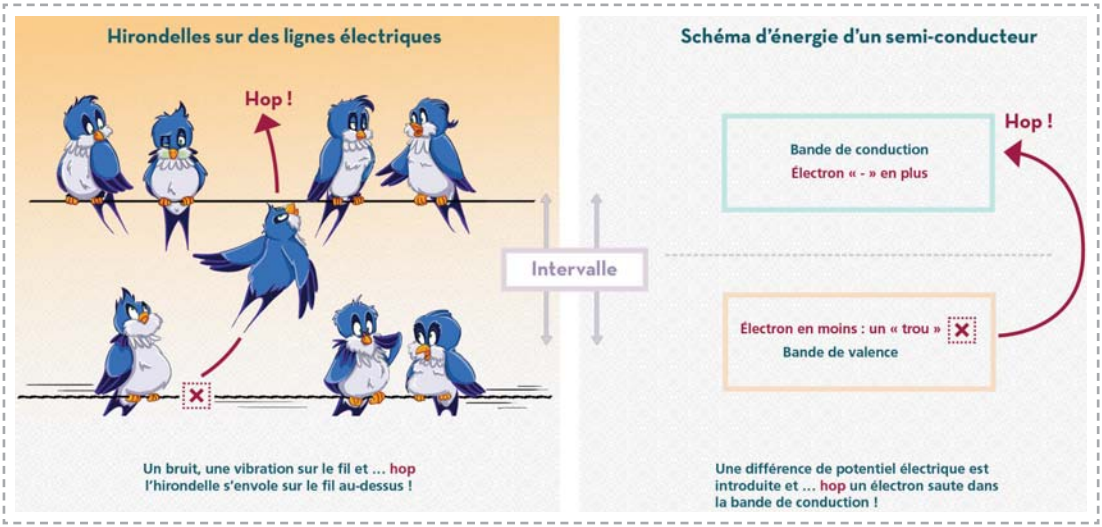



**Figure 5**

Analogie entre des électrons dans un semi-conducteur et des hirondelles sur des lignes électriques.

Brusquement, l'une dérangée par un bruit, une vibration, s'envole. Elle bat des ailes et dépense donc de l'énergie pour gagner le fil du haut. Sur ce dernier, dans la rangée, il y a une hirondelle de trop et dans la rangée du bas, il y a donc un trou. Ce trou peut être comblé par les hirondelles du bas qui se déplacent mais aussi par une hirondelle du haut qui se sent trop serrée. Dans les deux cas, il y a eu transport et déplacement d'hirondelles.

Si on remplace les hirondelles par des électrons, on retrouve le schéma d'énergie d'un semi-conducteur. Entre la bande de valence du bas et la bande de conduction du haut, il y a un saut d'énergie le « gap » ou intervalle. Pour faire sauter un électron du bas vers le haut, il faut lui fournir de l'énergie par une différence de potentiel par exemple. Si le potentiel est insuffisant, l'électron ne pourra pas sauter, et c'est seulement si le potentiel est plus grand que le gap (un volt pour le silicium) que l'électron sautera en créant par son départ un trou dans la bande de valence.

Le transistor fonctionne comme un interrupteur (*Figure 6*).

Pour appliquer une tension, on se sert de trois électrodes sur un silicium dopé P (P comme positif). Par les électrodes (source et drain), on instille des charges négatives N. Au repos, aucun courant ne passe entre les électrodes (*Figure 6A*). Si on applique une tension suffisante sur la grille, la polarité du silicium (+) est inversée et devient (-) et le courant circule alors entre la source et le drain. On est donc passé

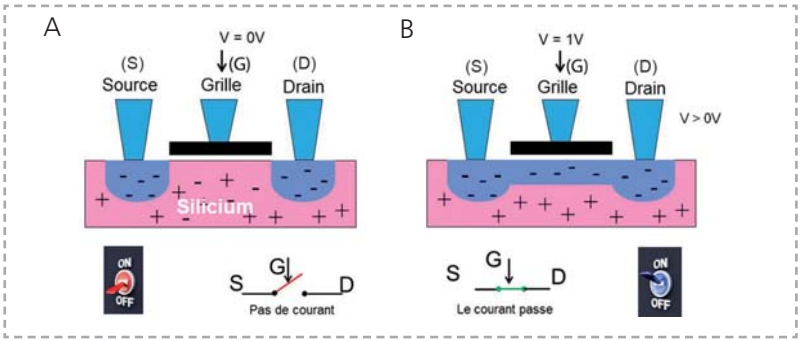



**Figure 6**

Schéma de fonctionnement d'un transistor sans courant (A) et avec courant (B).
Source : ST Microelectronics

d'une configuration « pas de courant ou très faible courant (OFF) » à une « configuration courant qui passe (ON) » (*Figure 6B*). On peut affecter des chiffres à ces situations : 0 à OFF et 1 à ON. On vient de fabriquer une première mémoire électronique.

Les fabrications de transistors sont de deux types. À haute performance, pour les microprocesseurs, le courant est de quelques centaines de microampères (ON # $10^{-3}$ ampère). En ce qui concerne les transistors basse consommation, pour les téléphones portables, les smartphones et les lecteurs mp3, le courant est plus faible (ON # $10^{-6}$ ampère) et (OFF #$10^{-9}$ ampère), ce qui minimise la consommation et sauvegarde l'autonomie des objets nomades.

# Du transistor à la puce intelligente

Quand on démonte un smartphone, son « cerveau » se présente sous la forme d'un boîtier de un à deux centimètres de côté avec sur chacun de ses quatre côtés une multitude de pattes de connexion (*Figure 7A*). Si on ouvre le boîtier, on découvre « la puce » qui renferme toutes les fonctions électroniques reliées à l'ensemble du smartphone par ses connexions (*Figure 7B*).

En détachant les connexions, la puce apparaît. C'est un support de silicium qui a été détaché du « wafer » que nous avons vu précédemment.

Au microscope électronique, on peut encore décortiquer et examiner l'intérieur de la puce de quelques mm² et tout d'abord les bandes en couches très minces de métal, qui par une interconnexion en trois dimensions, relient entre eux les transistors (*Figure 7E*).

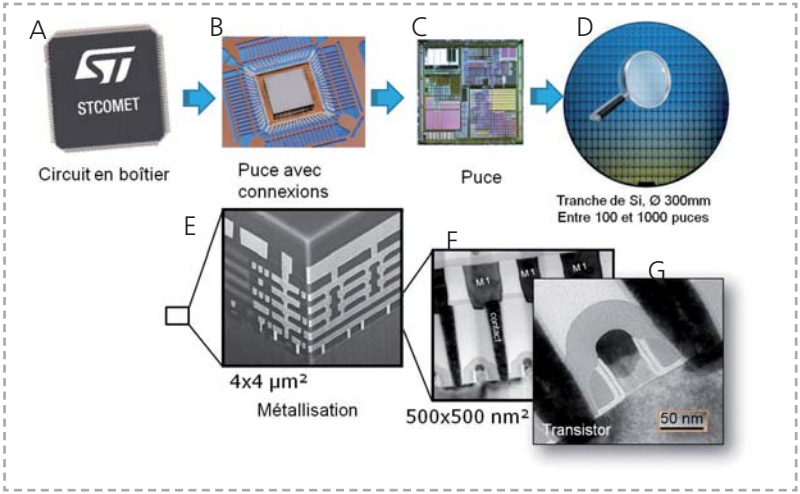



**Figure 7**

Du circuit au transistor : le circuit en boîtier (**A**) ; la puce avec connexions (**B**) ; la puce (**C**) ; la plaquette de silicium 300 mm (**D**) ; la métallisation ou « back-end » (**E**) ; zoom sur la métallisation (**F**) ; zoom sur un transistor (**G**). Source : ST Microelectronics.

À l'échelle inférieure, apparaissent les transistors proprement dits, avec la métallisation qui permet les contacts entre le silicium et les électrodes que nous venons de voir, la source, le drain et la grille (*Figure 7F* et *7G*).

À ce niveau, on voit que le transistor n'est pas plus grand que 50 nm (nm = nanomètre ou $10^{-9}$ m).

On peut en placer des millions et même des milliards par cm². Aujourd'hui, dans un smartphone, il y a plus de puissance de traitement informatique que celle regroupant tous les ordinateurs de la NASA, qui en 1969, ont porté les spationautes sur la Lune.

Pour accomplir cette performance technologique des appareils grand public, il faut au moins deux centaines d'opérations physico-chimiques qui doivent toutes se pratiquer en salle blanche (ateliers sans aucune poussière), quasi toutes automatisées, avec quantité de composés chimiques : acides, solvants, polymères, gaz , tous extrêmement purs.

***Remarque***

Un cheveu a une épaisseur moyenne de 50 microns (un micromètre = $10^{-6}$ m), c'est dire que le transistor est 1 000 fois plus fin.

# La loi de Moore

C'est le physicien W.B. Shockley qui, en 1947, a découvert le phénomène du transistor sur un montage un peu « bidouillé » d'un cristal de silicium. Puis la société américaine TEXAS Instrument sortit un premier circuit élémentaire (un transistor – une résistance – une capacité) dans les années 1960. Les premiers vrais microcircuits et processeurs sont apparus dans les années 1970. Le premier de TEXAS comportait 2 000 transistors ; alors que le Pentium 4, 27 ans plus tard, en contenait 50 millions.

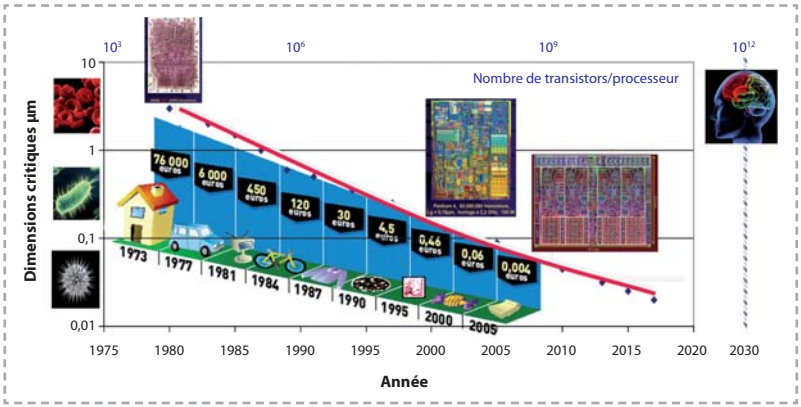



**Figure 8**

En 1973, fabriquer un million de transistors coûtait 74 000 euros alors qu'actuellement le coût est inférieur à 0,01 euro !

Actuellement, les derniers micro-processeurs d'Intel atteignent deux milliards de transistors. En une quarantaine d'années, on a pu réduire la taille des transistors de quelques microns (la taille d'un globule rouge) à quelques dizaines de nanomètres (la taille d'un virus). C'est ce qui permet d'obtenir des tablettes et des smartphones assez puissants et capables comme un ordinateur de surfer sur Internet. Cette miniaturisation s'est accompagnée d'une production de masse qui a permis une réduction drastique des coûts (*Figure 8*).

Gordon Moore, docteur en chimie et fondateur de la société Intel, avait prédit, dès 1965, que le nombre de transistors que l'on pouvait graver sur support de silicium allait doubler tous les ans. Baptisée « loi de Moore », cette prédiction a été revue en 1975 (doublement tous les deux ans) et à nouveau en 2010 (doublement tous les trois ans).

Elle débute avec 16 000 transistors en 1975 pour atteindre 256 millions en 2000 et quatre milliards en 2015. Ceci a été obtenu en passant d'une

technologie de limite de gravure de 120 nm à 32 nm et un nombre d'opérations nécessaires à la fabrication de la puce passant de 180 à 280.

Cette course à la miniaturisation conduit à la généralisation de toute la microélectronique à l'informatique, à la robotique, à la communication, aux objets connectés, qui ont permis des progrès immenses en productivité. Ces avancées doivent beaucoup à la physico-chimie de la gravure, c'est la lithographie.

# La Lithographie

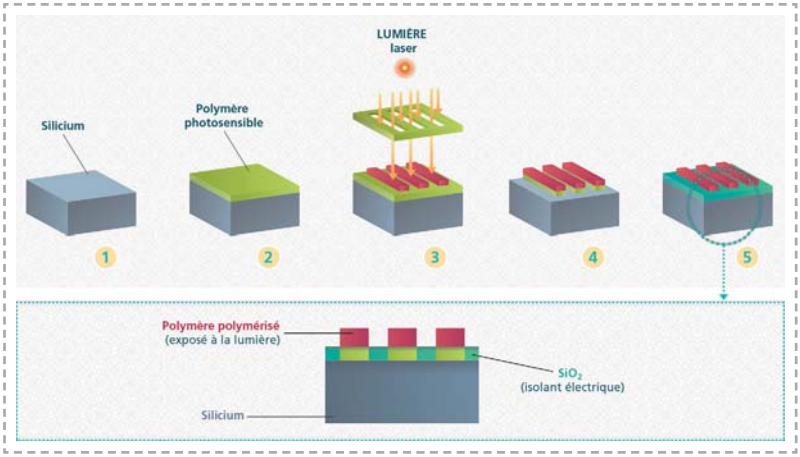
***Un polymère photosensible*** est un composant qui se polymérise uniquement dans les zones qui sont exposées à la lumière.

La lithographie est une technique qui ressemble à la photographie argentique. Les zones exposées à la lumière développent une réaction chimique qui fait qu'elles se différencient ensuite, lors de l'attaque par un solvant chimique, soluble ou insoluble. Ici, on utilise un rayonnement optique, une lumière si possible d'une très faible longueur d'onde fournie par un laser ou un rayonnement X. Cette lumière passe à travers un « masque » où des trous ont été dessinés en liaison avec la structure et l'arrangement des zones du processeur. On revêt le silicium d'un polymère photosensible (*Figure 9*).

On dissout le polymère non polymérisé par un solvant sur les zones non exposées. Puis par un procédé d'oxydation à l'oxygène, on développe sur ces zones une couche de dioxyde de silicium ($SiO_2$) qui est un isolant électrique.

**Figure 9**

La litographie réalisée grâce à la lumière d'un laser.



Avec un nouveau masque, on renouvelle l'opération pour obtenir des zones de silicium qui pourront être exposées à un gaz contenant un dérivé phosphoré pour doper, par recuite, ces zones.

On renouvelle ces opérations : dépôt, illumination, dissolution, isolation électrique, traitement thermique, dopages, métallisation, gravures… sur le substrat de départ.

Pour mette en œuvre ces différentes opérations, divers réactifs (HF, $NO_3H$, $NH_4OH$), solvants organiques, gaz neutres et gaz chargés en dérivés phosphorés ou du gallium sont utilisés. Le point essentiel est que tous ces réactifs doivent être d'une grande pureté « électronique » et exempts de poussières.

Ils sont préparés par des branches spécialisées de l'industrie chimique. Tout au long de la fabrication et de ces opérations, des contrôles dimensionnels très stricts sont réalisés. L'un des objectifs principaux est, par exemple, de respecter l'isolation électrique entre les différents transistors individuels séparés par quelques dizaines de nanomètres (nm). Quand on place un milliard de transistors sur environ 1 $cm^2$, il faut aussi tenir compte de l'échauffement possible de quelques dizaines de degrés d'un transistor à l'état passant (courant ON) sur son voisin à l'état bloqué (courant OFF).

Quand un milliard de transistors doivent être interconnectés, on imagine la complexité du plan en 3D qui doit être suivi et des opérations en salle blanche avant l'encapsulation de la puce.

**Remarque**

De même, pour la métallisation, dans les années 1970, on empilait deux niveaux de couches de transistors, les pattes métalliques passant d'un niveau à l'autre. Actuellement, le nombre de couches est passé de 3-4 à 13 étages qui exigent des « ascenseurs », des « escaliers » des « autoroutes » métallisés à l'intérieur du circuit intégré pour que les électrons et le signal puissent circuler.

## Conclusion

**La fabrication des circuits intégrés et des micro-processeurs a atteint une maturité technologique formidable grâce à des investissements des grands groupes américains, japonais, coréens, franco-italiens (ST Microélectronique) et une recherche de pointe. Dans nos smartphones, on pourrait stocker plus de 100 dictionnaires ! un dictionnaire représente environ dix mégaoctets, ce qui correspond à peu près à 1 $mm^2$ du cœur de la puce soit une tête d'épingle.**

# STOCKER L'ÉNERGIE POUR COMMUNIQUER

Les téléphones portables, les ordinateurs, les tablettes mais aussi les micro-implants biomédicaux, les réseaux de capteurs intelligents pour recueillir et transmettre les informations et pour communiquer entre eux ont tous besoin d'un système d'alimentation, de stockage et de récupération d'énergie.

Les batteries sont le système de stockage le mieux connu de tous, mais pour communiquer il faut transposer aux systèmes de moyennes dimensions et aux microsystèmes ce que l'on connaît déjà dans les systèmes de grandes dimensions comme les véhicules électriques.

**Remarque**

L'origine étymologique du mot « batterie » signifie échange de coups, bagarre, bataille…

## Qu'est-ce qu'une batterie ?

En science, si l'on met les charges positives et les charges négatives en ordre de bataille, on parle d'électricité et cela peut faire des étincelles donc de l'énergie.

Si le chimiste utilise des molécules chimiques qui peuvent produire des charges positives prêtes à « se bagarrer » avec des charges négatives, c'est un phénomène électrochimique.

Ces systèmes capables de produire, stocker et distribuer de l'électricité à volonté sont devenus, aujourd'hui, des outils indispensables à nos voitures, aux avions y compris ceux qui utilisent l'énergie solaire, à nos téléphones portables, aux dispositifs médicaux tels que le pacemaker… sans oublier les piles pour nos montres, nos réveils…

**Remarque**

Il faut rappeler que le cerveau, le cœur… « ont inventé » ce système comme source d'énergie bien avant nous, bien avant les batteries, bien avant l'Homme tel qu'il est aujourd'hui…

Les batteries (ou accumulateurs) et les piles sont des systèmes électrochimiques qui stockent de l'énergie sous forme chimique et la restituent sous forme électrique.

**Remarque**

La seule différence entre une pile et une batterie est que la pile n'est pas rechargeable et donc une fois usée, elle devient jetable.

# Comment fonctionne une batterie ?

Une batterie chargée possède un excès d'électrons (e-) sur sa plaque négative et un manque d'électrons sur sa plaque positive.

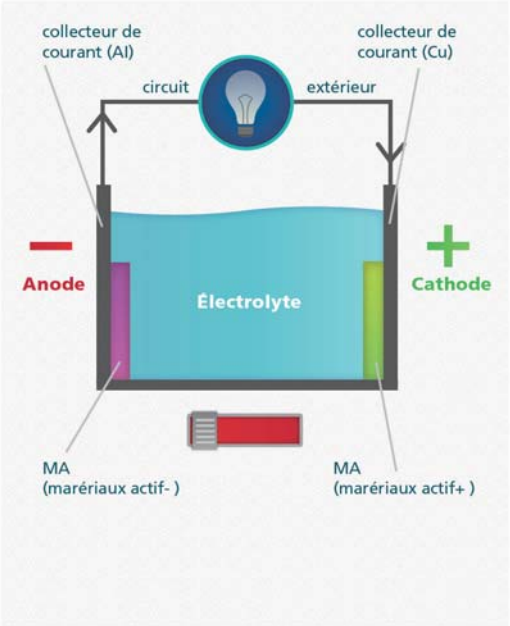
Chacune des électrodes comporte une feuille métallique (le collecteur de courant) sur laquelle est déposé un matériau électrochimiquement actif sous forme de poudre (MA sur la *figure 1*).

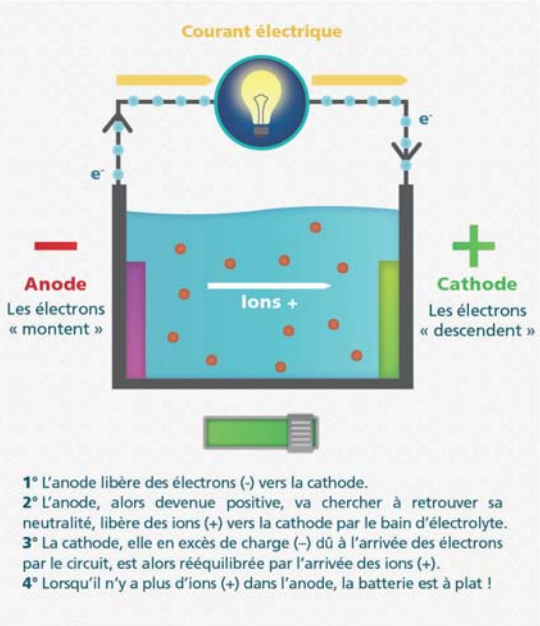
***Le courant*** est produit par la circulation d'électrons entre deux plaques que l'on appelle électrodes.

**Figure 1**

Fonctionnement d'une batterie.

Les électrodes (anode / cathode) sont constituées de métaux et leurs atomes cherchent toujours à rester neutres : charges négatives (électrons : e-) = charges positives.




1° L'anode libère des électrons (-) vers la cathode.
2° L'anode, alors devenue positive, va chercher à retrouver sa neutralité, libère des ions (+) vers la cathode par le bain d'électrolyte.
3° La cathode, elle en excès de charge (–) dû à l'arrivée des électrons par le circuit, est alors rééquilibrée par l'arrivée des ions (+).
4° Lorsqu'il n'y a plus d'ions (+) dans l'anode, la batterie est à plat !

Ce matériau est caractérisé par la facilité ou la difficulté qu'il a d'accepter ou de délivrer une charge électrique. C'est ce que l'on appelle son potentiel électrique E.

Les matériaux sont classés sur une échelle de potentiel.

La batterie est caractérisée par sa tension qui est la différence de potentiel entre ces deux matériaux. Cette tension dépend du couple de matériaux utilisé et peut être schématisée par le principe du toboggan (*figure 2*) dont la hauteur joue un rôle du potentiel.

## La décharge

1. Le matériau de l'électrode négative (l'anode) libère des électrons (il s'oxyde) et les relâche *via* le collecteur de courant (en rouge sur la *figure 1*) dans le circuit extérieur.
2. Ces électrons du circuit extérieur arrivent (*via* le collecteur) à l'électrode positive (la cathode) et sont consommés par le matériau de l'électrode (il se réduit).

À l'intérieur de la batterie, la circulation du courant est assurée par le déplacement d'ions chargés dans l'électrolyte : les ions positifs vers la plaque négative et les ions négatifs vers la plaque positive.

Lorsque les deux plaques possèdent le même nombre d'électrons (e-), la batterie ne débite plus de courant ; elle est déchargée.

## La recharge

C'est la réaction inverse de la décharge qui se produit.

1. On apporte des électrons à l'anode et le matériau actif se réduit.
2. On enlève des électrons à la cathode pour que le matériau actif soit oxydé.

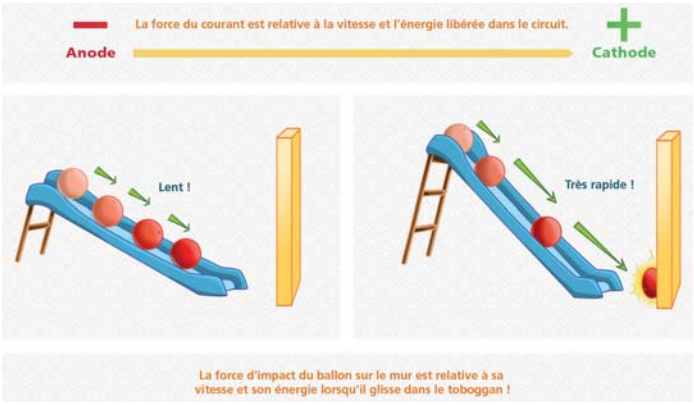
Pour qu'une batterie soit efficace, il faut :

– que les matériaux d'électrodes libèrent la plus grande quantité d'électrons possible par unité de masse ;
– que la différence de potentiel entre les électrodes soit la plus élevée possible.

## Le principe du toboggan

Nous pouvons comparer la différence de potentiel, donc la tension et ainsi la force du courant à un toboggan.

**Figure 2** Principe du toboggan.




Plus le toboggan est long ou incliné, plus vite ira le ballon lancé du haut de la passerelle. Un mur mis au bout du toboggan pourra mesurer la force d'impact du ballon, en fonction de sa vitesse (*Figure 2*).

Dans le cas de la batterie, cela correspond à la quantité d'électricité donc à l'énergie qui est libérée.

**Remarque**

Une anecdote étymologique démontre le bien fondé du schéma ci-dessus : en grec, anode = montée et cathode = descente ; les électrons partent de l'anode et vont vers la cathode…

# Trouver les bons matériaux

Si pour une voiture, le poids de la batterie est déjà un problème à prendre en compte, qu'en est-il pour un ordinateur, un smartphone, etc. qui sont des objets beaucoup plus légers ?

## Le rôle des chimistes

Les chimistes doivent trouver les matériaux les plus adaptés pour :

– recouvrir l'anode ;
– recouvrir la cathode ;

**Remarque**

La différence de potentiel entre les électrodes avec le lithium et ses dérivés est la plus élevée sans oublier la facilité avec laquelle le lithium a tendance à céder ses électrons.

– définir la différence de potentiel la plus grande possible entre les deux électrodes ;
– déterminer l'électrolyte, ce bain ou gel dans lequel baignent les électrodes. Cette « route » qui permet aux électrons de circuler de la cathode à l'anode et *vice versa* doit être bien « goudronnée » de façon à assurer un va-et-vient des ions, facile et sans encombre.

Après de nombreux essais utilisant du plomb (Pb), des combinaisons comportant des métaux tels que le manganèse (Mn), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le nickel (Ni), le cadmium (Cd)… le choix a été arrêté sur le lithium (Li) et ses dérivés vers les années 1990.

### *Exemples de couples anode/cathode.*

Plomb et oxyde de plomb ; différence de potentiel : 2 volts.
Zinc et oxyde de manganèse ; différence de potentiel : 1,5 volts.

Tous ces efforts sur les matériaux d'électrodes combinés à ceux associés aux électrolytes (la meilleure route…) ont permis des progrès extraordinaires sur l'efficacité, l'autonomie, le volume et le poids des batteries.

Ainsi et à titre d'exemple, un téléphone portable dans les années 1990 avait presque la taille d'un téléphone fixe d'aujourd'hui, un poids conséquent et une autonomie d'une journée à peine.

De nos jours, le téléphone est miniaturisé et permet de naviguer sur Internet, prendre des photos pendant deux à trois jours sans être rechargé.

Un autre exemple illustratif est le « pacemaker », cet appareil que l'on greffe dans la poitrine des personnes souffrant de pathologies cardiaques graves.

La figure ci-dessous donne une idée représentative des progrès accomplis en termes de taille depuis 1976 (*Figure 3*).

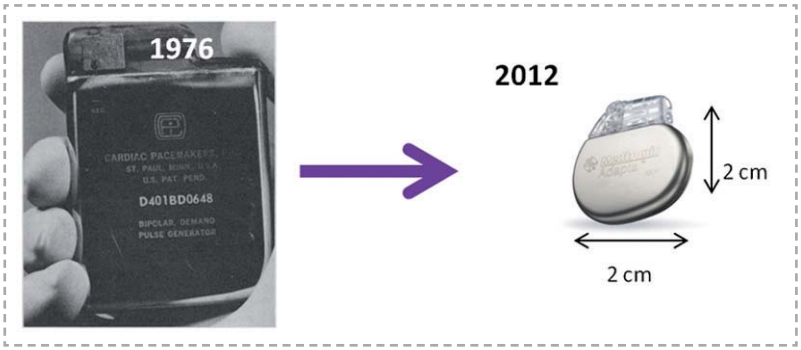



**Figure 3**

Diminution du volume des batteries pour un pacemaker entre 1976 et 2012.

Ce dispositif fonctionne de façon discontinue, il peut ainsi assurer son rôle pendant trente à quarante ans une fois implanté dans le corps humain.

# Les batteries au lithium

Dans la recherche de couples de matériaux (anode/cathode), le lithium a trouvé sa place.

Dans de telles batteries, l'électrode négative (anode) est en lithium et l'électrode positive (cathode) est en oxyde mixte de lithium et de cobalt (Li $CoO_2$).

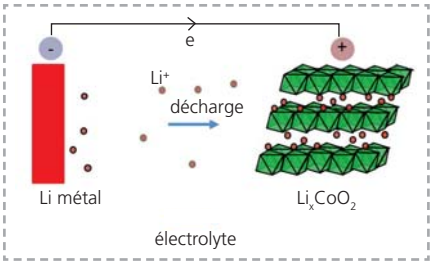



**Figure 4**

Principe d'une batterie au lithium métal.

Pendant la décharge, le lithium perd un électron et le libère dans le circuit extérieur, et le cation $Li^+$ migre dans l'électrolyte de la batterie.

L'oxyde de lithium cobalt doit être capable d'accepter à la fois :

– un électron apporté par le circuit extérieur ;
– des ions $Li^+$ arrivant *via* l'électrolyte de la batterie : ce qui est rendu possible grâce à sa structure en feuillet (en vert sur la figure). Les ions $Li^+$ (boules rouges) s'intercalent entre les feuillets.

**Remarque**

Dans ce couple lithium et lithium / oxyde de cobalt la différence de potentiel est plus de deux fois plus grande.

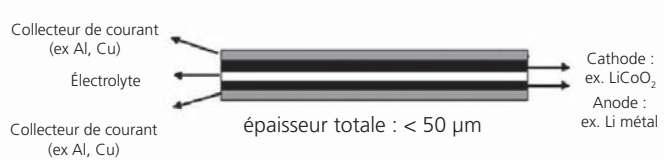
# La course à la miniaturisation

Les futurs développements sollicitent bien sûr et de nouveau la chimie.

Dans la course à la miniaturisation, le premier procédé de fabrication des microbatteries est le dépôt en couches minces des matériaux qui la constituent (*Figure 5*).

**Figure 5**

Profil d'une micro-batterie 2D couches minces. Flexible, sa mise en œuvre est simple.




**Remarque**

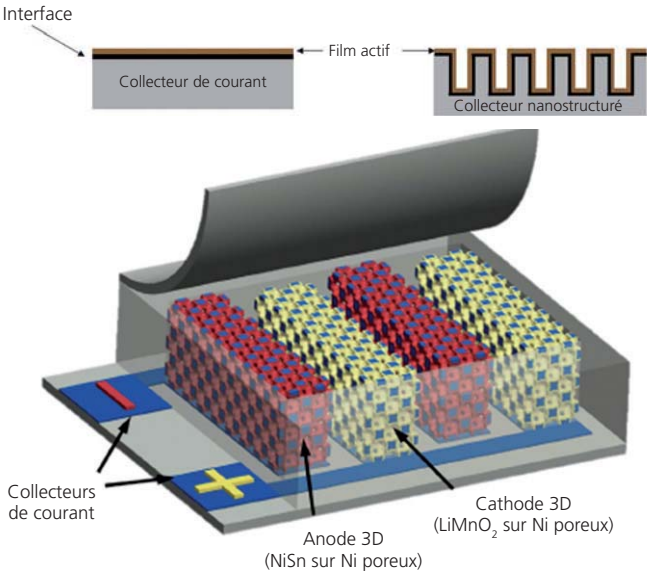
L'épaisseur d'une batterie au lithium est d'environ 50 microns.

Ce procédé est facile à mettre en œuvre mais si l'on veut disposer de puissance suffisante, il faut déposer les matériaux sur de grandes surfaces, ce qui est difficile en ce qui concerne les petits objets.

Pour y remédier, une technique apparue il y a quelques années consiste à créer des batteries en trois dimensions afin d'utiliser une surface plus grande pour un même volume (*Figure 6*).

**Figure 6**

Profil d'une micro-batterie 3D.



Actuellement, on commence à développer des microbatteries 3D étirables, déposées sur silicone, c'est-à-dire sur des écrans souples (voir le chapitre « La chimie des écrans souples ») qui présentent beaucoup d'avantages pour l'utilisation comme pour le stockage de l'énergie. Enfin, soulignons l'intérêt du développement des batteries souples et flexibles à mettre dans sa poche…

## Conclusion

**Toutes ces évolutions nécessitent l'amélioration des techniques de dépôt et de synthèse des matériaux pour mieux revêtir l'anode et la cathode. Ces développements s'inspirent des technologies « d'imprimerie » utilisées aujourd'hui pour la conception des matériaux en électronique.**

**Il faut aussi mettre au point de nouveaux matériaux comme l'utilisation de silicium comme anode, ou des électrolytes et des cathodes à haut potentiel… cela concerne toutes les batteries, même celles de grandes tailles utilisées pour les véhicules.**

# LES RADARS DES AVIONS RAFALE

Les radars sont des systèmes de télécommunications qui utilisent le principe de l'écho pour détecter les objets, leur position, vitesse, forme, taille ainsi que pour les avions, leur direction et leur altitude.

Pour les avions de chasse comme le Rafale, toutes ces informations doivent être très précises et obtenues en un temps très court. Oui mais comment ?

Figure 1

## *Comment fonctionne un radar ?*

### L'écho

Qui n'a jamais crié son nom dans la montagne afin d'écouter le retour de sa voix ?

Ce phénomène que l'on nomme écho, du nom de la nymphe grecque, est à la base du principe d'un radar. En effet, la voix qui est une onde sonore vient taper contre la montagne et revient vers nous comme une balle que l'on enverrait contre un mur (*Figure 2*).

De même, certains animaux comme la chauve-souris émettent des ondes dites ultrasonores (non perceptibles par l'oreille humaine) qui lui reviennent en écho. Ce système de localisation de l'écho lui sert non seulement à diriger son vol mais aussi à repérer les insectes dont elle se nourrit.

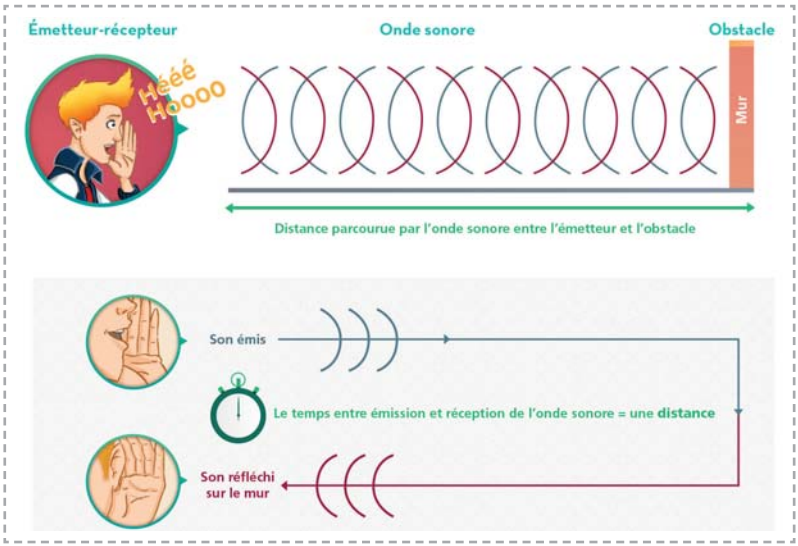



**Figure 2**

Le principe de l'écho : la voix, onde sonore, heurte l'obstacle qui réfléchit le son.

Dans ces deux exemples, il s'agit de l'écho d'une onde sonore, alors que pour les radars, on utilise le même phénomène avec une onde électromagnétique.

**Remarque**

Les ondes électromagnétiques sont décrites dans le chapitre « Internet dans un grain de sable ».

## Le principe

Le système radar émet des petits paquets d'ondes électromagnétiques (des impulsions) et utilise la propriété de ces impulsions de se réfléchir en totalité ou en partie sur un obstacle. Cet instrument de mesure détecte ensuite le retour de ces impulsions et la différence de temps entre l'émission et la réception de l'impulsion détermine la distance de l'objet (*Figure 3*).

**Figure 3**

Le système radar émet et reçoit des ondes électromagnétiques, c'est ce qui lui permet de détecter les obstacles.

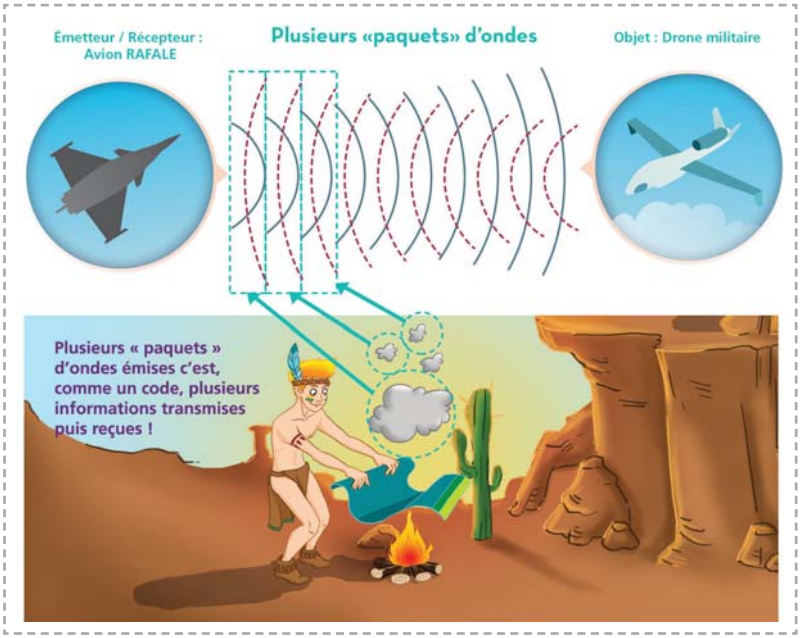
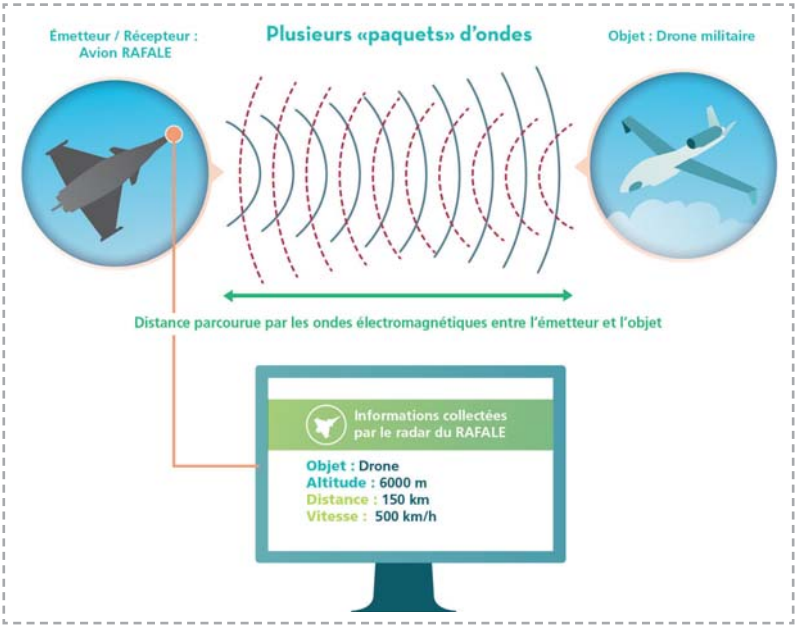



**Figure 4**

En plus de l'écholocalisation, la fonctionnalité de dialogue permet de collecter des informations détaillées de la cible.



Les radars modernes utilisent le principe du dialogue en plus de l'écholocalisation. Pour cela, ils émettent des suites d'impulsions de durée très courte et de grande puissance contenant des messages, ce qui en retour permet d'avoir plus d'informations sur les cibles rencontrées (*Figure 4*).

C'est un peu comme la communication des Indiens avec les nuages de fumée : un nuage n'apporte pas beaucoup d'informations, alors que plusieurs petits nuages peuvent contenir tout un message codé.

***Un système radar*** est un ensemble complexe de composants dans lequel deux éléments sont indispensables : l'émetteur et le récepteur.

# Où est la chimie ?

La chimie joue un rôle clé dans la conception et dans la fabrication des émetteurs et des récepteurs que l'on trouve aussi bien dans le radar d'un Rafale que dans les satellites de communication ou dans les téléphones portables.

De même que la force de la voix est nécessaire pour obtenir un bel effet d'écho, l'émetteur du radar, en particulier celui du Rafale, doit avoir une bonne portée et cela exige une forte puissance des impulsions qu'il émet. Il faut donc emmagasiner beaucoup d'énergie, dans des volumes les plus petits possibles. C'est à ce niveau que les matériaux nécessaires à la fabrication de l'émetteur/récepteur rentrent en jeu.

**Remarque**

Dès que l'on veut télécommuniquer, il faut des émetteurs/récepteurs.

Les nouveaux matériaux utilisés dans les radars modernes résultent d'une collaboration étroite entre les chimistes et les physiciens, et ce pour la mise au point de leur composition, fabrication et enfin leur intégration dans les composants électroniques dans lesquels ils sont utilisés.

# Quels sont les matériaux utilisés ?

Les matériaux utilisés doivent conduire l'électricité, c'est-à-dire que les électrons des atomes doivent pouvoir circuler facilement dans le matériau, tout en pouvant être contrôlés dans leur déplacement et même stockés.

La *figure 5* permet de mieux comprendre. Elle représente l'énergie de liaison des électrons des atomes d'un solide dans trois cas différents.

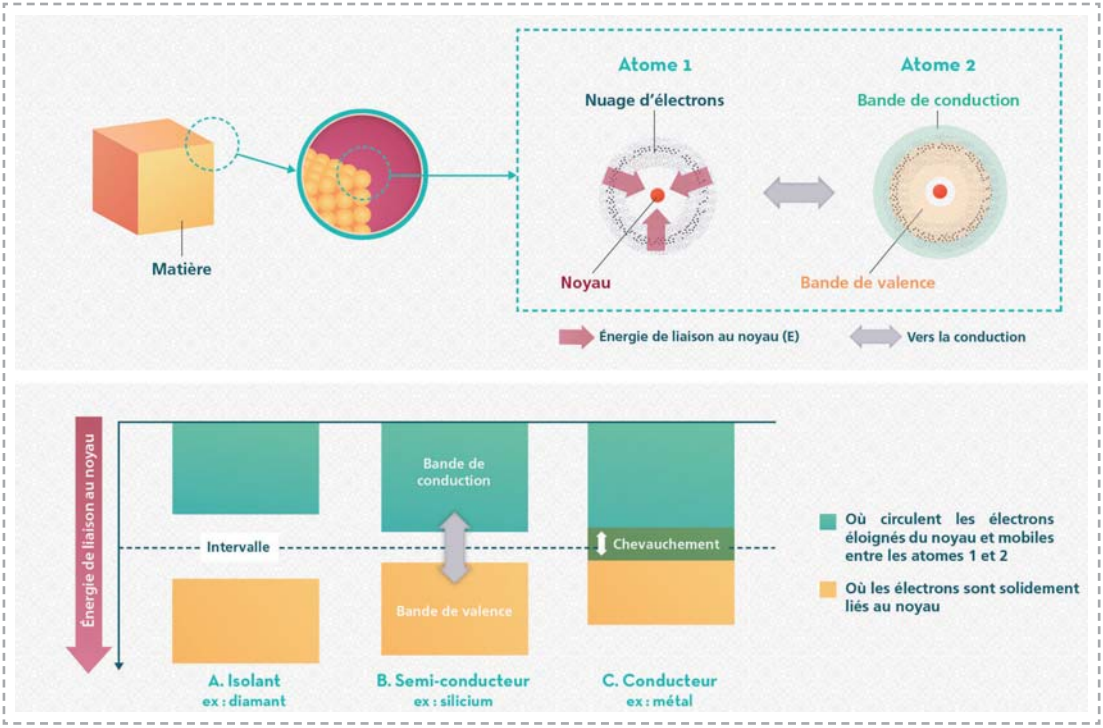



**Figure 5**

Énergie de liaison des électrons dans un solide.

**Remarque**

Les électrons solidement liés à leur noyau sont tous dans une bande d'énergie caractéristique des électrons liés.

On peut, de façon très simplifiée, se représenter un atome comme un noyau central autour duquel se déplacent des électrons qui sont liés à ce noyau par une énergie de liaison E. Cette énergie de liaison est d'autant plus faible que les électrons sont loin du noyau. Ceux qui sont sur la couche externe (comme la pelure d'un oignon) sont les moins liés, et c'est l'énergie de liaison de ces électrons qui est représentée sur la *figure 5*.

Dans le cas de la *figure 6* en haut, l'énergie de liaison des électrons de la couche externe de chaque atome du matériau est élevée, les électrons restent donc solidement liés au noyau de leur atome et ne peuvent pas passer d'un atome à l'autre : ce sont des matériaux Isolants.

Dans le cas d'un semi-conducteur (au centre de la *figure 6*), les électrons de la couche externe des atomes sont capables de passer

facilement d'un atome à l'autre. Ils sont situés dans une bande correspondant à une énergie de liaison plus faible appelée bande de conduction.

***La bande de conduction*** est l'espace permettant aux électrons les plus éloignés des noyaux de deux atomes de passer d'un atome à l'autre.

Dans le cas d'un isolant (*Figure 6* en haut), tous les électrons périphériques des atomes du matériau sont dans la bande des électrons liés. Il est impossible de leur fournir l'énergie nécessaire pour les faire passer dans la bande de conduction. C'est le cas du diamant qui est constitué d'atomes de carbone avec six électrons, dont quatre sont sur la couche externe. Ces quatre électrons ne peuvent passer d'un atome de carbone A à un atome de carbone B.

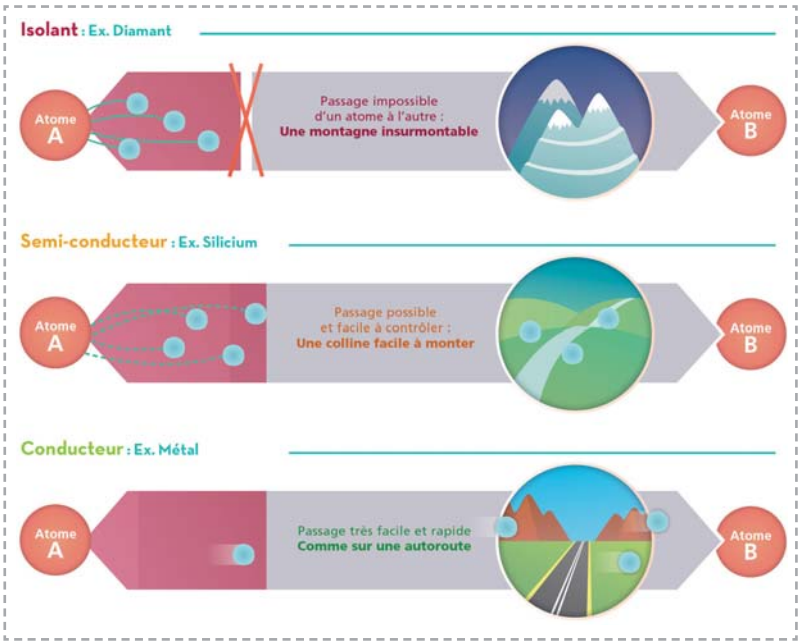



**Figure 6**

Principe de circulation des électrons externes entre les bandes de valence et de conduction.

Les quatre électrons du diamant sont comme des cyclistes qui pour aller du point A au point B devrait passer par le sommet du Mont-Blanc.

Dans le cas d'un métal conducteur (*Figure 6* en bas), les électrons périphériques passent très facilement d'un atome à l'autre : la bande de conduction est pratiquement la même que celle des électrons liés. Ces matériaux sont conducteurs de l'électricité. C'est le cas d'un métal comme l'étain qui a aussi quatre électrons sur sa couche externe pouvant se déplacer facilement d'un atome à l'autre dans la bande de conduction, et 46 autres électrons dans les couches liées.

**Remarque**

Les électrons de conduction sont comme les cyclistes qui pour aller de A à B circulent sur une piste cyclable plate.

Le cas intermédiaire (*Figure 6*, centre) est celui où l'énergie qu'il faut fournir aux électrons de la couche externe pour passer dans la bande de conduction est faible, et il est assez facile pour les électrons d'un tel matériau de passer d'un atome à l'autre. Cependant on peut aussi facilement contrôler ce passage.

Ces solides font partie de la famille des métaux semi-conducteurs. C'est le cas du silicium qui, comme le carbone, a quatre électrons sur sa couche externe pouvant facilement passer dans la bande de conduction et dix autres électrons fortement liés qui restent localisés sur chaque atome.

**Remarque**

Si nous reprenons l'exemple des cyclistes, les électrons de la couche externe sont comme les cyclistes qui montent facilement la petite colline pour aller de A à B.

# La famille des métaux semi-conducteurs

Cette famille des métaux semi-conducteurs est celle qui nous intéresse pour la fabrication des composants électroniques des émetteurs et des récepteurs et plus généralement de tous les composants électroniques.

Le silicium présente l'avantage, comme le diamant, de former des cristaux très stables chimiquement et très résistants, sans défaut, ce qui est important pour ses propriétés de conduire l'électricité : c'est comme le cycliste qui circule idéalement bien sur une piste cyclable parfaite et sans obstacle.

## Les semi-conducteurs III-V : c'est quoi ?

**Remarque**

Le semi-conducteur le plus connu et le plus utilisé depuis plus de 60 ans est le silicium qui est le matériau emblématique des hautes technologies de la communication.

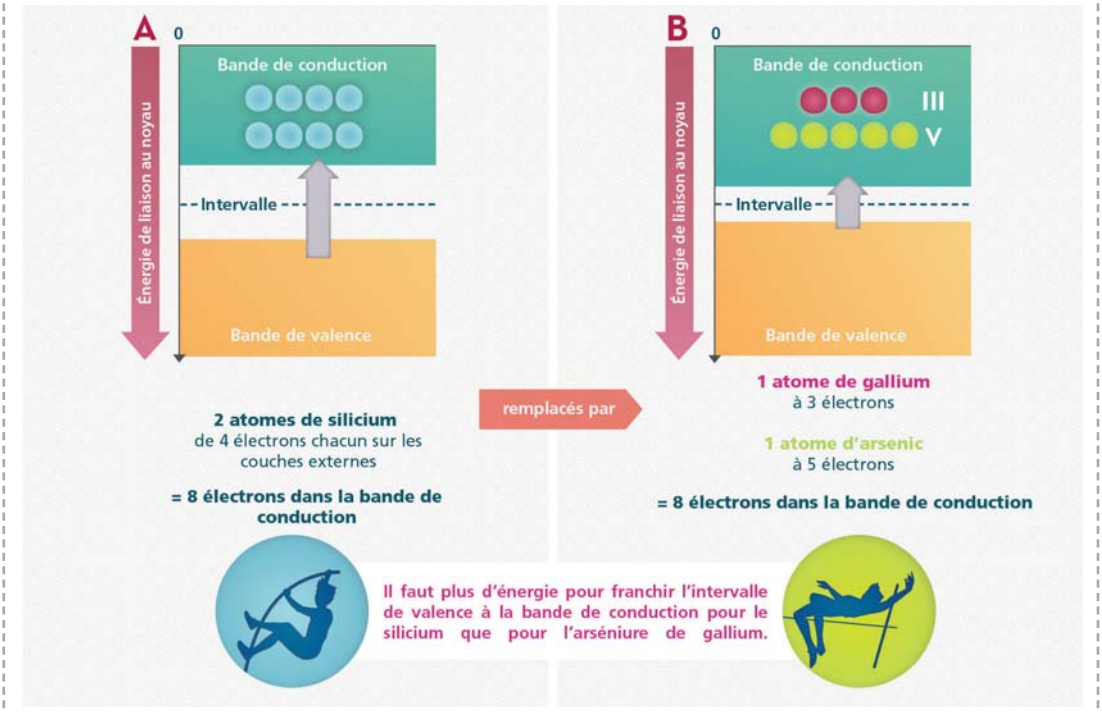
Pour améliorer les propriétés des composants électroniques, il faut enrichir le matériau afin par exemple d'augmenter la mobilité des électrons dans la bande de conduction ou pour les utiliser dans des émetteurs et des récepteurs d'ondes très différentes (radar, radio, laser…). Dans ce but, les chimistes ont réalisé des mélanges d'atomes possédant les mêmes propriétés de base que le silicium.

La *figure 7A* représente le cas (fictif) de deux atomes de silicium isolés dans un solide semi-conducteur, avec les huit électrons de la couche externe (électrons les plus éloignés du noyau) dans la bande de conduction.

La *figure 7B* représente ce que l'on obtient quand on remplace les deux atomes de silicium par un atome de gallium qui a trois électrons (en rouge sur la figure) sur sa couche externe et un atome d'arsenic qui a cinq électrons (en bleu) sur sa couche externe.

**Figure 7**

Principe d'enrichissement d'un matériau pour le rendre semi-conducteur de type III-V.




On a alors le même nombre d'électrons dans la bande de conduction et la barrière à franchir pour les électrons, pour sauter dans la bande de conduction, est plus faible.

Sur ce principe, les chimistes ont fabriqué des solides bien cristallisés, sans défaut, résistants, en combinant des éléments avec trois électrons sur la couche externe (aluminium, gallium, indium) et d'autres qui ont cinq électrons périphériques (azote, phosphore, arsenic, antimoine).

Et cela a marché ! Par exemple, le nitrure de gallium a une densité de puissance 1 000 fois plus élevée que le silicium, ce qui est très important quand on recherche la performance et la miniaturisation en même temps.

Les électrons sont comme des cyclistes dans une équipe du Tour de France : pour franchir plus vite la colline, il vaut mieux des cyclistes avec des qualités différentes (par exemples les bleus qui poussent les rouges dans la côte) que des cyclistes avec tous les mêmes faiblesses.

# Du gaz au lingot : comment fabriquer les semi-conducteurs III-V ?

En micro-électronique, il faut réaliser des composés ultra-purs et bien cristallisés, sans défaut.

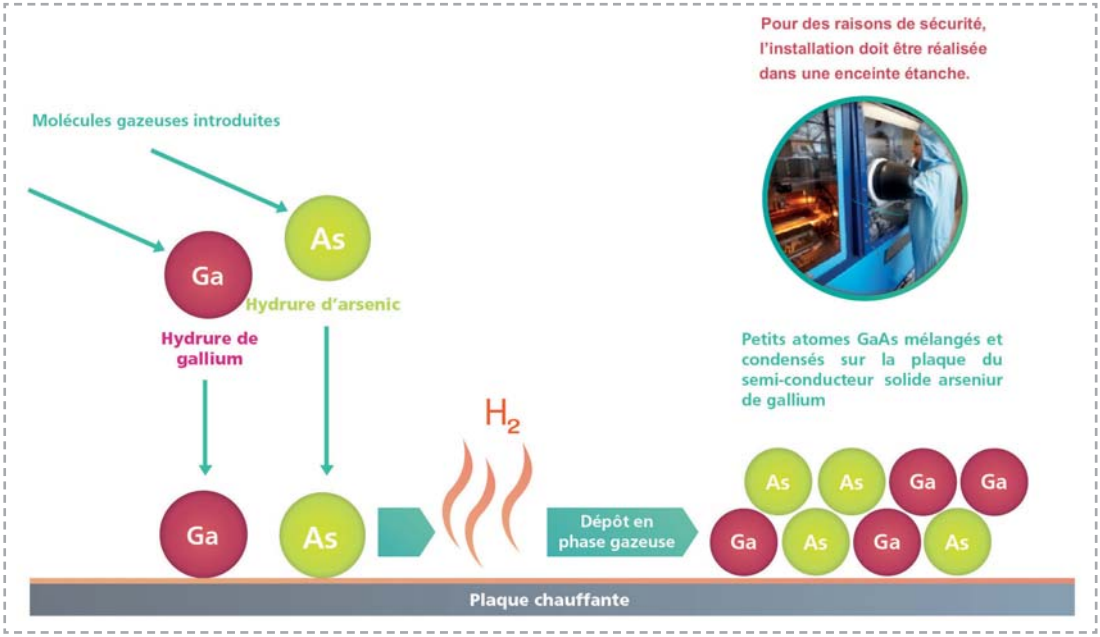
Pour cela et afin d'obtenir des produits purs à 99,9999 %, les chimistes doivent travailler sur :
– le choix des mélanges de produits de départ ;
– le choix des procédés à utiliser.

Deux grandes méthodes sont utilisées.

La première est une réaction en phase vapeur : on mélange deux gaz A (hydrure de gallium) et B (hydrure d'arsenic) qui se décomposent en hydrogène (qui s'évapore) et en atomes d'arsenic et de gallium. Ces atomes se combinent sur la plaque en couche de semi-conducteur Ga-As.

**Figure 8**

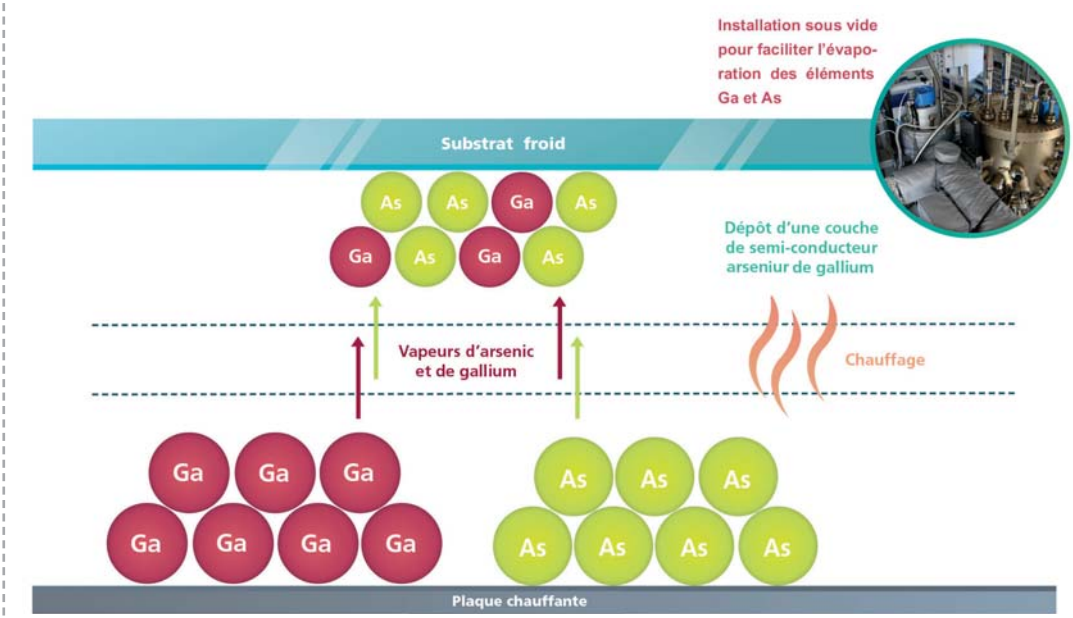
La réaction en phase vapeur.



L'autre technique est le dépôt sous vide (*Figure 9*). De l'arsenic et du gallium sont vaporisés sur une plaque chauffante et vont se condenser sur un substrat froid en formant des couches d'arsenic et de gallium.

**Figure 9**

Le dépôt sous vide.



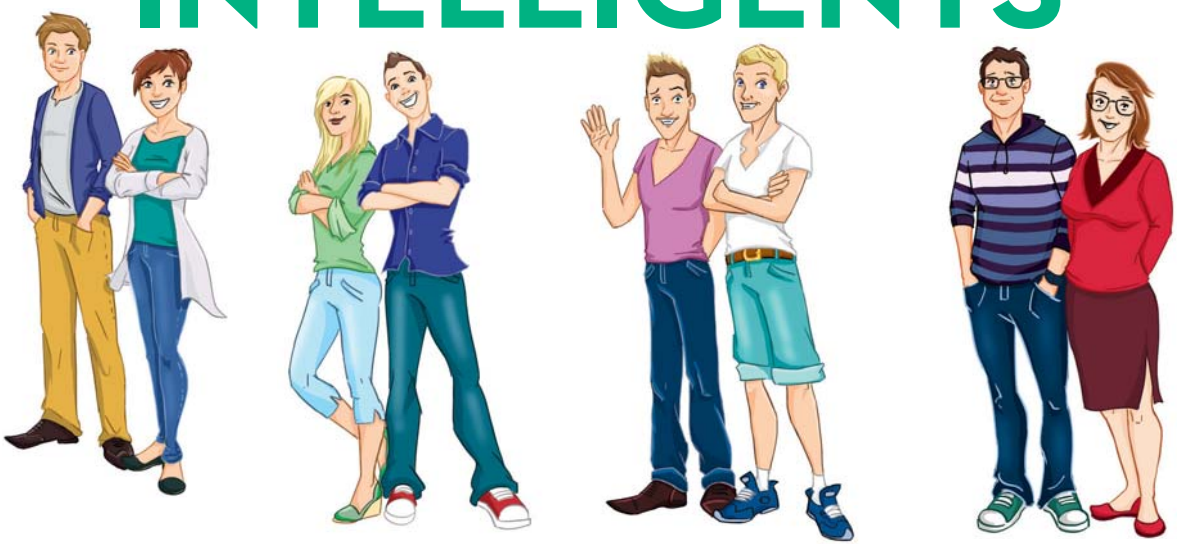

## Conclusion

### La chimie doit mettre au point les matériaux de demain.

**Tous ces semi-conducteurs III-V déjà largement utilisés le seront encore plus demain car ils sont à la base du développement de l'Internet haut débit mondial.**
**Les développements ne sont pas encore tous accessibles, il reste toujours de nombreux verrous techniques que la chimie doit résoudre : les techniques de fabrication sous vide, les puretés extrêmement élevées, des solides sans défauts.**
**Aujourd'hui, on fabrique des quantités de l'ordre de quelques kilos. Elles sont déposées sur des surfaces de l'ordre du $cm^2$ ; à l'avenir il faudra passer à la tonne et au mètre carré.**
**On travaille pour le moment avec des métaux rares comme le gallium, mais il faudra changer d'échelle et le remplacer par d'autres éléments plus facilement accessibles.**
**Au travail les chimistes !**

3 PARTIE

# DES CHIMISTES AU SERVICE DES NOUVEAUX OBJETS INTELLIGENTS



# DES CHIMISTES AU SERVICE DES NOUVEAUX OBJETS INTELLIGENTS

En 2013, cinq couples d'étudiants journalistes et chimistes sont partis camera au poing, autour du monde, explorer la contribution des chimistes à la réalisation des nouveaux objets intelligents.

Leurs vidéos sont accessibles sur http://actions.maisondelachimie.com/world_tour_reportages_video_2013.html

Nous allons vous raconter leurs aventures et vous comprendrez que lorsque vous possédez une tablette ou un smartphone résistant muni d'un écran tactile performant, c'est grâce à la chimie.

Les montres smartphones (qui apparaissent déjà sur le marché) et les écrans de télévision ou de tablettes qui se déroulent ne font plus partie du domaine de la science-fiction et que c'est aussi grâce à la chimie.

Vous découvrirez, comme eux, que derrière toute cette haute technologie, travaillent des professionnels exerçant des métiers d'avenir passionnants.

# La molécule des écrans tactiles

**Destination Chine : Anthony (étudiant journaliste) et Thyphanie (élève ingénieur) partent à la découverte de cette molécule appelé LiTFSi.**

Les nombreux atomes de Fluor de LiTFSi attirent les électrons et permettent leur dispersion (*Figure 1*).

Cette molécule est incorporée dans le film plastique qui protège les écrans, elle est indispensable pour la fabrication des écrans tactiles.

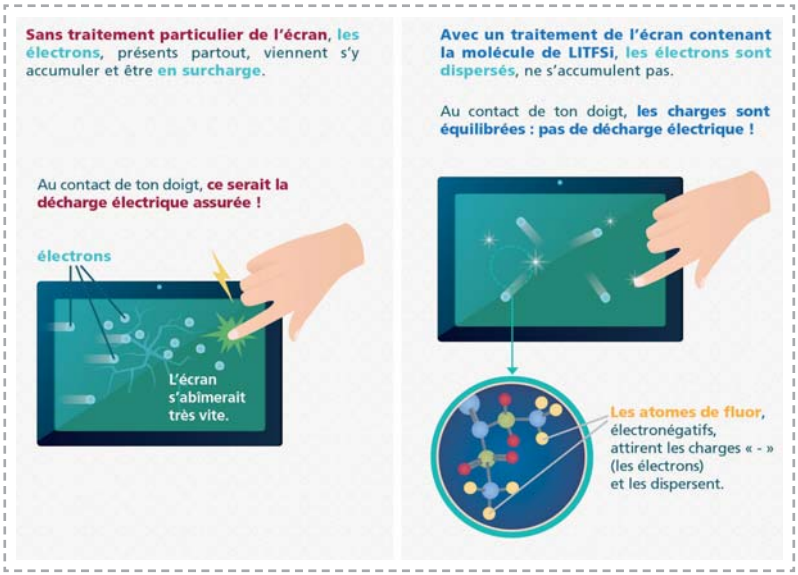



**Figure 1**

Dispersion des électrons par les atomes de fluor de LiTFSi.

**Remarque**

La molécule LiTFSi empêche l'accumulation des charges électriques qui détériorent rapidement les écrans plats.

## Pourquoi cette molécule est-elle si importante ?

La molécule LiTFSi a les mêmes propriétés antistatiques que d'autres molécules, mais c'est l'une des rares molécules qui soit transparente.

Elle a été découverte au centre de recherche SOLVAY de LYON. Elle est difficile à préparer car elle absorbe très vide l'humidité ambiante et devient liquide et inutilisable.

Pour qu'elle ne se dégrade pas, les ingénieurs du centre de recherche ont mis au point la fabrication de LiTFSi en atmosphère contrôlée (*Figure 2*).

**Figure 2**

La fabrication sous atmosphère contôlée au centre de recherche de LiTFSi.

## De Lyon à la conquête du marché asiatique

Anthony et Thyphanie ont retrouvé la molécule LiTFSi à l'usine SOLVAY de Suzhou (à 100 km de Shanghai) où elle est fabriquée (*Figure 5*) en grosse quantité (plus de 100 tonnes/an) pour les clients asiatiques.

**Figure 3**

L'atelier de fabrication de LiTFSi.

Avec le responsable de l'assistance client de l'usine, nos étudiants ont suivi la molécule chez le client « Blue Star Silicone » qui incorpore LiTFSi dans des films de silicone (*Figure 4*) pour fabriquer des centaines de mètres carrés de film antistatique (*Figure 5*).

**Figure 4**

L'incorporation de LiTFSi dans un film de silicone.

**Figure 5**

La fabrication des film antistatiques.

## Conclusion

**Grâce à la chimie, des centaines de mètres carrés d'écrans de tablettes, de smartphones et d'ordinateurs sont protégés de l'accumulation des charges électriques et peuvent donc être utilisés comme écrans tactiles.**

# Les nano-pochoirs pour la nano-électronique

**Destination France : Quentin (étudiant en BTS de chimie) et Philibert (étudiant journaliste) sont partis à la rencontre des équipes françaises dans les laboratoires Arkema à Pau à ceux du CEA à Grenoble.**

## De l'ordinateur à la montre connectée : la course à la miniaturisation

Les nouvelles montres ordinateurs vont nous permettre de faire les mêmes actions qu'une tablette de 700 g qui elle-même fait pareillement voire beaucoup plus et beaucoup plus vite que les premiers ordinateurs de quatre tonnes (*Figure 1*).

**Figure 1**

La miniaturisation et les mêmes performances !

## Comment en est-on arrivé là ?

***Un processeur*** est un composant de l'ordinateur qui exécute les instructions machines. Dans le microprocesseur, tous les composants ont été miniaturisés pour tenir dans un unique boîtier lui-même très petit.

La chimie des polymères conducteurs permet grâce à la nanolithographie de graver de plus en plus d'informations sur des plaques de silicium de plus en plus petites (voir le chapitre « Toujours plus petit »).

La nanolithographie grave des circuits électroniques de taille inférieure à 40 nanomètres, c'est-à-dire plus fins qu'un dix-millième de cheveu, en fabriquant des pochoirs munis de petits trous ou de petites lamelles arrangées périodiquement et qui sont les deux structures de base des microprocesseurs.

## Les COPO ou la chimie des nano-pochoirs

C'est dans les laboratoires de recherches d'Arkema à Pau que tout commence avec la fabrication des copolymères à bloc appelés COPO (voir chapitre la « chimie des écrans souples »).

Sur la *figure 2*, un ingénieur de recherche montre les deux flacons de molécules de polymères A et B, qui mélangées, vont s'accrocher les unes aux autres pour donner la poudre de copolymère à bloc C.

**Figure 2**

La fabrication des COPO en laboratoire.

La *figure 3* montre l'atelier de production des COPO.

**Figure 3**

L'atelier de production des COPO.

## La fabrication des pochoirs

C'est au LETI (laboratoire de recherche du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) à Grenoble que nous allons suivre la fabrication du pochoir qui servira à réaliser les nano-composants électroniques.

***1 nanomètre*** = 1/1 000 000 000 mètre. Les nano-composants ont des dimensions de l'ordre de 1 nanomètre.

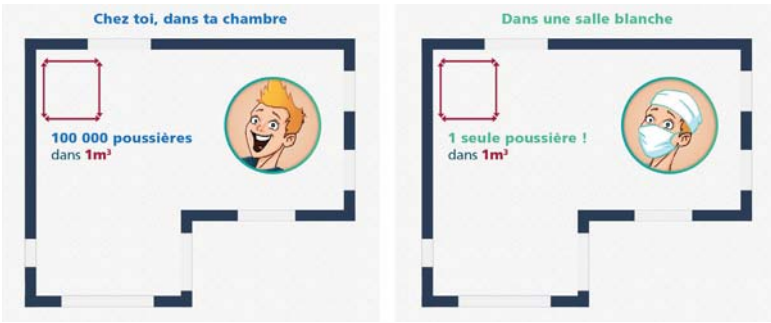



**Figure 4**

Une salle blanche est une salle sans poussière

**Remarque**

Attention, la poussière est l'ennemi de l'électronique, et tout doit être extrêmement propre dans les laboratoires de recherche comme dans l'atelier de production (*Figure 4*). On ne doit pas y trouver plus d'une poussière par mètre cube, on appelle ce type de lieux une salle blanche.

La *figure 5A* représente le dessin d'une molécule de COPO avec les deux couleurs différentes des polymères A et B qui y sont associés.

L'ingénieur de recherche montre à Quentin et Philibert sur un microscope électronique l'aspect, à l'échelle du nanomètre, de la structure d'une fine tranche de COPO (*Figure 5B*).

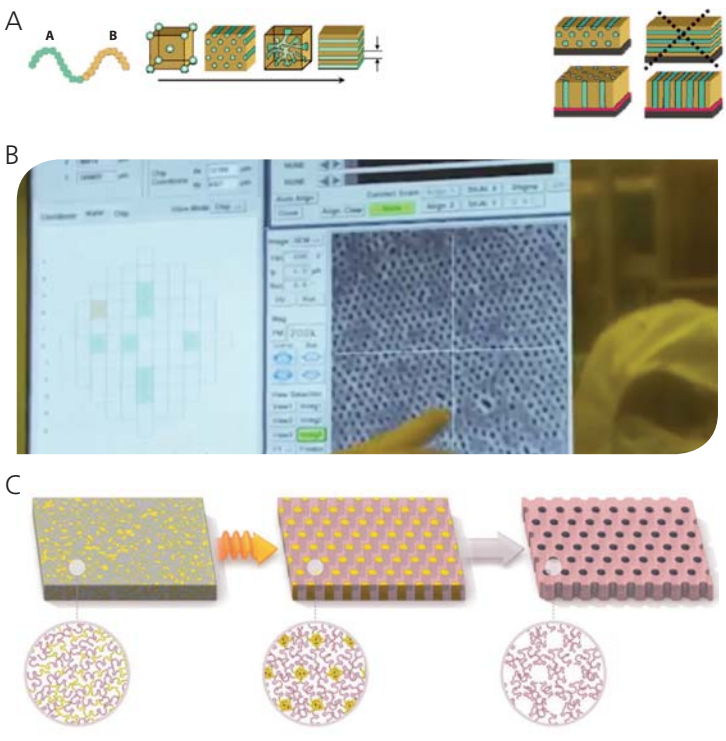



**Figure 5**

Du COPO à une structure à trous : **A)** un mélange de COPO a deux composants (jaune et vert) conduisant à deux types de structures à trous ou à lamelles ; **B)** image de microscopie électronique d'une fine tranche de COPO ; **C)** le polymère jaune, orienté vers l'extérieur par chauffage est enlevé par décapage et laisse une matrice avec des petits trous noirs.

Le copolymère noir est ensuite éliminé par décapage chimique, ce qui conduit à une matrice constituée de trous de la taille de quelques nanomètres (*Figure 5C*).

Ceci implique que le COPO soit sans défaut, ce qui n'est pas le cas sur l'échantillon où l'on voit quelques trous irréguliers.

On peut, de la même façon, créer des structures lamellaires (*Figure 5A*).

Après destruction du polymère noir (trous ou lamelles), les bons échantillons de COPO sont déposés sur des puces de silicium et utilisés comme un pochoir pour créer des circuits intégrés.

Dans l'atelier de nanolithographie (*Figure 6*), on opère par étape : on réalise d'abord, par des procédés de lithographie classique, des puces de 120 nm que l'on remplit ensuite de copolymère à bloc pour créer des puces de diamètres inférieurs (de l'ordre de 15 nanomètres).

**Remarque**

Pour que les nano-circuits fonctionnent bien, il faut que tous les trous soient rigoureusement identiques.

**Figure 6**

Un atelier de nanolithographie, un exemple de salle blanche.

## Conclusion

**Les designers de microélectronique peuvent ainsi libérer leur imagination pour concevoir de nouveaux circuits en sachant qu'on saura les fabriquer.**

# Les écrans flexibles

**Destination Allemagne : Marion (étudiante journaliste) et Mickael (élève ingénieur) sont partis en Allemagne visiter le laboratoire d'innovation de l'université de Heidelberg.**

De jeunes chercheurs de ce laboratoire collaborent avec des ingénieurs de recherche de BASF pour fabriquer les prototypes des écrans de demain (*Figure 2*) : des écrans souples et incassables destinés aux télévisions, portables et tablettes.

**Figure 1**

Dans le futur, des écrans flexibles et incassables.

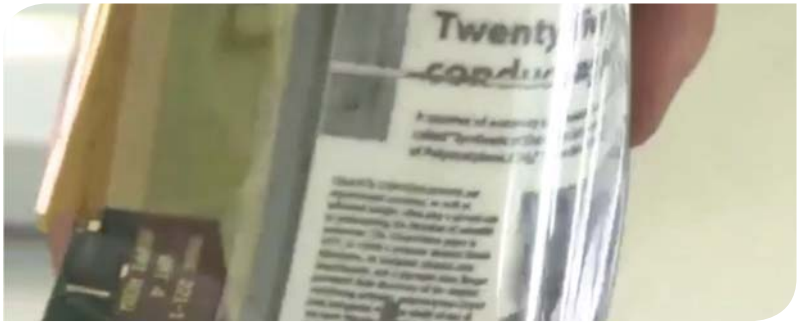


**Figure 2**

Prototype d'écran flexible.

# Quand le journal de Harry Potter devient réalité

L'une des applications de l'électronique organique imprimée de ces futurs écrans est expliquée dans le chapitre « La chimie des écrans souples ».

Actuellement, dans les écrans portables, chacune des informations données par les pixels est contrôlée par des transistors en silicium déposé sur du silicone rigide. Dans les écrans de demain, les transistors seront réalisés en polymères organiques déposés sous forme d'encres imprimées sur des feuilles de plastique souples et incassables.

***Pixel*** : unité de base qui permet de définir une image.

***Transistor*** : composant électronique actif.

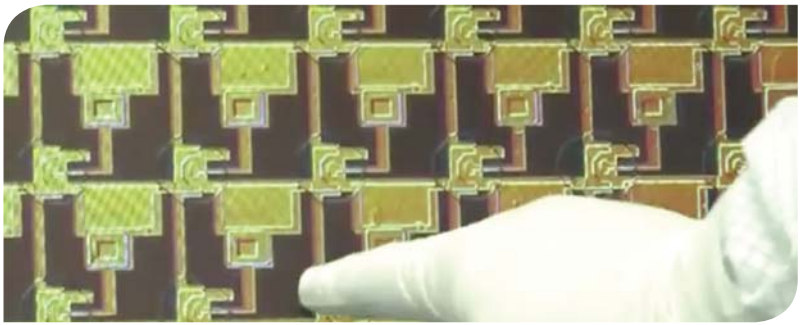


**Figure 3**

Image de microscopie électronique de transistors organiques imprimés.

La *figure 3* montre l'image en microscopie électronique de ces millions de transistors.

Dans le futur, ces nouveaux transistors seront imprimés en grande quantité par des imprimantes 3D comme celles que l'on voit sur la *figure 4*, avec des encres en pot (*figure 5*).

**Figure 4**

Imprimante 3D : les techniques de l'impression ont été transposées pour l'électronique organique.

**Figure 5**

Un Pot d'encre constituée de polymères organiques conducteurs.

***Remarque***

Les chimistes savent maintenant produire à basse température des encres conductrices, semi-conductrices, isolantes et électro-actives.

## Conclusion

### À quand les écrans flexibles pour tous ?

**Probablement dans cinq à dix ans car à l'heure actuelle, des défauts subsistent. Entre autres, l'impression de tous les transistors à l'identique et en grande quantité n'est pas encore au point ; mais c'est pour demain !**

# Les écrans vibreurs

**Destination San Francisco : Agathe (élève ingénieur) et Stéphane (élève journaliste).**

Ils ont allés visiter le salon qui présente l'avant-garde des technologies nomades avant de partir découvrir dans la Silicon Valley, la fabrication des écrans qui transforment le son en vibration.

Au salon, ils ont joué à un jeu vidéo durant lequel ils ressentaient les explosions dans leurs doigts ainsi qu'à un jeu de flipper vidéo transmettant les chocs sur le trajet des billes.

## Comment ça marche ?

De San Francisco à la Silicon Valley, partons à la découverte des polymères électro-actifs (PEA) à l'origine de ces nouveaux écrans.

Le président directeur général de la société Vivi Touch, filiale du groupe Bayer, où ont été mis au point les polymères électro-actifs après dix ans de recherche (*Figure 2*) accueille Agathe et Stéphane.

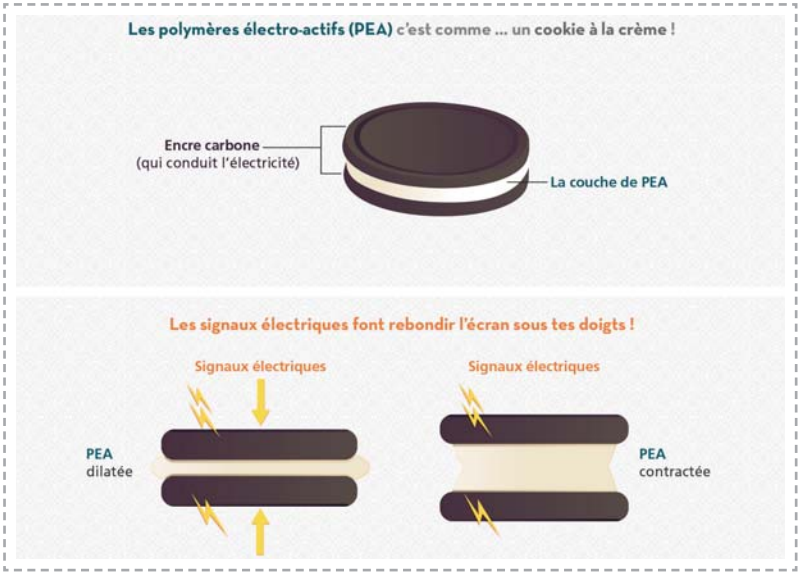
**Figure 2**

Le président directeur général présente les polymères électro-actifs.

Ce n'est pas difficile à comprendre explique le chercheur du laboratoire matériaux : c'est comme dans un cookie quand on presse la crème blanche contenue à l'intérieur. Ici, la crème blanche est en PEA et le biscuit est en carbone conducteur de l'électricité : grâce à des signaux électriques, on fait dilater ou se contracter la crème blanche de PEA (*Figure 3*).

**Figure 3**

Les polymères électro-actifs identiques au cookie à la crème.




## La fabrication d'un cookie électronique

La *figure 4* montre qu'après un passage au four, on peut facilement étendre la crème de PEA sous forme de film.

**Remarque**

La recette du mélange de molécules chimiques qui permet de faire la crème blanche de PEA est un secret industriel jalousement gardé.

**Figure 4**

Le polymère électro-actif est étendu en film à la sortie du four.

La *figure 5* montre la fabrication des cookies électroniques.

Sur les films de PEA, au-dessus et au-dessous, on dépose par sérigraphie des encres à base de carbone qui est le matériau conduisant les signaux électriques.

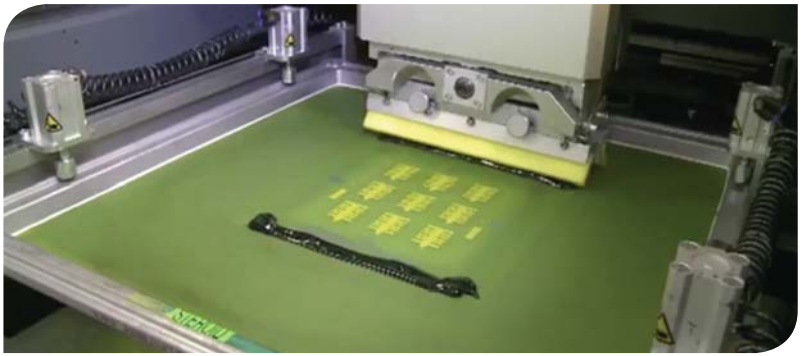


**Figure 5**

Fabrication des cookies électroniques obtenus par dépôts d'encres de carbone.

## Regarder et écouter un concert comme si on y était

L'ingénieur mécanicien de Vivi Touch qui collabore à ce programme explique que l'on peut aussi avec ce type d'écran couplé avec le son transmettre *via* un casque, la sensation de mouvement à travers les os de l'oreille et ressentir ainsi les mêmes sensations que lorsque l'on assiste (*figure 6*) à un concert.

**Figure 6**

Rencontre avec l'ingénieur mécanicien : comme au concert, le casque transmet les vibrations de l'écran aux oreilles.

Il suffit que les signaux envoyés aux PEA soient couplés avec la musique.

## Conclusion

**Tous ces résultats sont le fruit de la coopération d'une belle équipe qui réunit chimistes, mécaniciens et électroniciens.**

# La colle conductrice des tablettes et smartphones

**Destination Corée du Sud : Amélie (élève ingénieur) et Pierre (étudiant journaliste).**

Ils sont partis à la découverte de la colle miracle dans la filiale créée depuis 20 ans de l'entreprise française PROTAVIC-Protex international.

Les milliers de composants électroniques des smartphones et des tablettes sont liés par une colle qui doit non seulement être conductrice de l'électricité mais doit aussi résister :
– à la chaleur libérée lors de l'envoi des images, ou sur le téléphone laissé au soleil ;
– à l'humidité ;
– aux chocs.

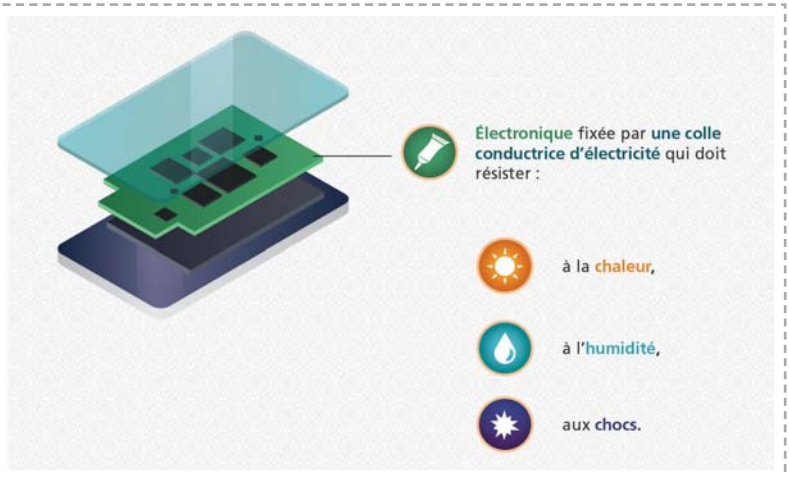



**Figure 1**

Les différentes propriétés indispensables de la colle utilisée en électronique.

Malheureusement les colles époxy classiques résistent mal à la chaleur.

## La colle miracle

Amélie et Pierre ont rencontré le vice-président du département recherche et développement de l'entreprise française dont les laboratoires sont à l'origine de cette colle miracle qui possède toutes les propriétés requises.

L'idée originale qui a conduit à cette application innovante a été de mélanger une résine appelée bismaléimide (polymère qui résiste à des températures élevées et est utilisé dans les freins automobiles) avec de la benzoaxine (molécule employée comme retardateur de feu en aéronautique) (*Figure 2*).

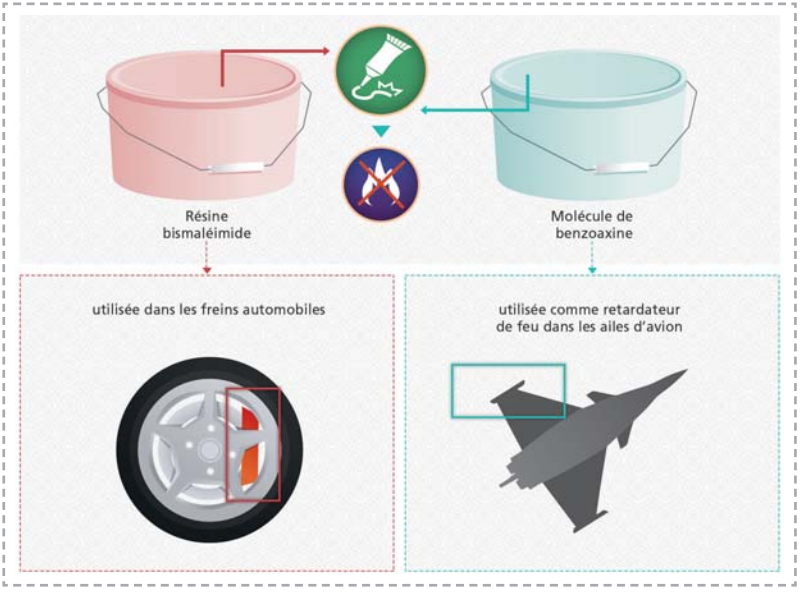



**Figure 2**
La recette de la colle miracle.

**Remarque**

Ces deux produits ont de plus l'avantage de ne pas contenir des chlorures toxiques donc d'être meilleurs pour la santé et l'environnement.

La *figure 3* montre le laboratoire où sont testées les propriétés de cette nouvelle colle qui résiste à tout dans des conditions où les colles classiques deviennent défectueuses : température, humidité, et pression de collage d'un petit morceau de silicone sur du métal.

**Figure 3**

Les propriétés de la colle sont testées au laboratoire.

Le directeur commercial est radieux quand il explique à Amélie et Pierre que la clientèle concernée s'élargit maintenant aux fabricants de semi-conducteurs et de LED. De plus, les débouchés de cette colle, issue de la chimie, qui offre de nouvelles possibilités d'assemblage par collage et qui prolonge la vie des appareils, sont en pleine expansion non seulement sur le marché asiatique mais dans le reste du monde.

# LES CHIMISTES DES TIC EN FRANCE

***Qui sont ces chimistes ?***
***Que font-ils ?***

Voici les grands domaines dans lesquels les chimistes français travaillent.

## *Les industriels de la chimie*

Les grands groupes industriels de la chimie (ARKEMA, SOLVAY, BASF, BAYER…) travaillent tous dans le domaine des applications de la chimie aux biens de consommation et le domaine de l'électronique y prend une place de plus en plus grande.

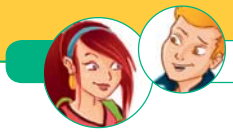
Des PME de haute technologie se développent y compris à l'international dans ce domaine en pleine expansion.

Les industriels de la chimie ont toujours vendu des produits chimiques aux industries utilisatrices et les chapitres précédents vous ont montré que, dans le domaine des tablettes et des smartphones comme dans beaucoup d'autres, la chimie est à la base de ces technologies modernes que ce soit au niveau des nouveaux matériaux qui constituent ces appareils ou qui en assurent le bon fonctionnement.

L'industrie chimique doit donc élaborer des produits toujours plus purs, toujours plus robustes, toujours plus performants et toujours plus innovants pour des applications qui sont toujours plus exigeantes.

**Les ingénieurs (chef de projet et chercheurs)** mettent au point, dans les laboratoires de recherche et développement de ces grands groupes, les matériaux, les molécules et les mélanges de molécules qui correspondent aux besoins de leurs clients du domaine de l'électronique.

Ils testent leurs propriétés avec l'aide de leurs collègues ingénieurs et techniciens des laboratoires de contrôle et d'analyses.



La recherche et le développement sont souvent conduits dans le cadre de coopération avec les chercheurs de la recherche publique, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), Centre national de la recherche scientifique (CNRS), universités, écoles d'ingénieurs…

Ces nouveaux produits sont fabriqués dans des ateliers de production dans des conditions (produits ultra-purs, nanotechnologies) qui exigent compétences et spécialisation des équipes d'ingénieurs, de techniciens et d'opérateurs de production.

**Les responsables de l'assistance client (ingénieur technico-commercial, responsable de vente, attaché commercial)** sont à l'écoute des nouveaux besoins et des nouveaux défis posés par les clients et les consommateurs.

# *Les grands groupes de la micro-électronique ou utilisateurs des applications de la micro-électronique*

Nous avons vu dans les parties 1 et 2 que les chimistes doivent être présents dans les grands groupes de la micro-électronique ou chez les utilisateurs de la micro-électronique pour bien utiliser les matériaux indispensables dans la course à la performance.

Nous avons constaté que les chimistes étaient présents pour améliorer : la sensibilité des microélectrodes des casques d'électro-encéphalographie, la qualité des fibres optiques, comme celle des différents constituants des Smartphones (de l'écran à la micro batterie) et même des radars.

Dans tous ces domaines, il faut en permanence créer de nouveaux matériaux ou de nouveaux produits issus de la chimie pour améliorer les performances. Ces nouveaux matériaux constituent aussi les lasers qui sont montés dans nombre de dispositifs d'usage comme les CD et les DVD.

Ils sont également à la base du développement de l'Internet mondial haut débit.

À relativement court terme, ils seront utilisés pour l'éclairage à très faible consommation et très grand rendement et pour l'alimentation électrique compacte dont on a besoin dans les ordinateurs.

Tous ces nouveaux développements s'inscrivent dans le contexte du commerce international soumis à des normes environnementales strictes que les chimistes doivent anticiper.

# Les différents métiers en chimie relatifs aux nouvelles technologies

Les domaines d'activité concernés sont les mêmes que ceux des industriels de la chimie.

On les répertorie de la façon suivante :

– la **recherche et développement** avec des niveaux d'études de Bac +2 à Bac +8 pour accéder à des métiers tels que **technicien**, **ingénieur**, **chef de projet** ;

– l'**analyse laboratoire, contrôle qualité** avec des niveaux d'études de Bac +2 à Bac +5 pour accéder à des métiers tels que **technicien et responsable de laboratoire** ;

– **qualité, hygiène, sécurité, environnement** avec des niveaux d'études de Bac +2 à Bac +5 ;

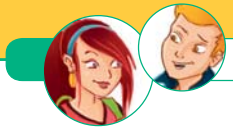
– **fabrication et production** avec des niveaux d'études de Bac +2 à Bac +5 ;

– **règlementation, assurance et qualité, affaires réglementaires** avec des niveaux d'études de Bac +5 ;

– **marketing et vente** avec des niveaux d'études de Bac +2 à Bac +5.

Les différents métiers accessibles dans ces différents domaines d'activités, ainsi que leurs filières d'accès sont détaillés dans l'espace métiers du site Médiachimie : www.mediachimie.org/espace-metiers

Quelques exemples sont traités dans les fiches métiers ci-après.



# Chef de projet / Responsable d'équipe de recherche

« Au quotidien, le chef de projet est responsable d'une équipe de recherche. Il contribue à la définition d'un projet en cohérence avec la stratégie de l'entreprise Il défini la stratégie de recherche et optimise les ressources humaines techniques et financières à utiliser en tenant compte des contraintes de délais. Il anime son équipe de recherche, il évalue les résultats collectifs et individuels. Il dialogue avec les responsables des autres disciplines de l'entreprise. Il connaît l'état de la concurrence et effectue une veille scientifique rigoureuse. Il contribue à la formation et au développement de carrière de ses collaborateurs. »

## Formation et prérequis

- Niveau Bac +5 (École d'ingénieurs ou Université) à Bac +8 (Doctorat) selon le domaine concerné
- Bonne maîtrise de l'anglais
- Plusieurs années d'expériences comme ingénieur de R&D

## Qualités requises

- Solide expérience scientifique et technologique, sens de l'innovation
- Grande capacité managériale
- Savoir gérer la complexité et faire des choix rigoureux en s'appuyant sur de grandes capacités d'analyse

## Salaire en début de carrière

- 55 à 85 K€

## Environnement de travail

- Son bureau est localisé généralement au siège de l'entreprise mais il est amené à se déplacer dans les autres centres de recherches et les usines des différents pays d'implantation
- Il assiste à des séminaires, colloques et salons professionnels en France et à l'étranger
- Il collabore avec les différents métiers de l'entreprise : les chercheurs, l'équipe commerciale, les administratifs du contrôle de gestion, les responsables de la prospective et de l'analyse du marché

## Débouchés et évolutions

- Directeur de R&D

# Ingénieur de recherche et développement

Au quotidien, l'ingénieur de recherche ou chercheur est au cœur de l'innovation et crée au quotidien de nouvelles molécules, des solutions techniques originales, recherche de nouvelles applications ou de nouvelles propriétés dans le cadre d'un projet de recherche qu'il aura contribué à élaborer. Il doit pour cela exercer une veille scientifique permanente ainsi qu'un état des lieux en temps réel des avancées de la concurrence. Il peut travailler seul mais a souvent la responsabilité d'une petite équipe de techniciens.

## Formation et prérequis

- Niveau +5 (École d'ingénieurs ou Université) à Bac +8 (Doctorat) selon le domaine concerné
- Bonne maîtrise de l'anglais
- Après leur thèse, certains docteurs font une ou plusieurs années en stage post-doctoral en France ou à l'étranger pour devenir expert sur certains sujets spécifiques

## Qualités requises

- Avoir le sens de l'organisation du travail scientifique et de la gestion d'équipe
- Savoir travailler avec des équipes d'autres disciplines
- Être créatif, scientifiquement rigoureux, avoir des capacités de synthèse et d'analyse
- Avoir une large culture scientifique et l'envie d'apprendre.
- Être passionné et persévérant

## Salaire en début de carrière

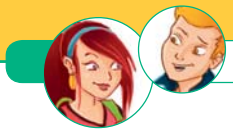
- 35 à 50 K€

## Environnement de travail

- Le centre de recherche ou un site de production
- Le laboratoire de R&D est à la charnière entre la production, ce qui la précède et ce qui en découle. Il est en contact permanent avec les laboratoires extérieurs
- L'ingénieur R&D participe à des colloques et séminaires en France et à l'étranger

## Débouchés et évolutions

- Chef de projet



# Technicien de Laboratoire de R&D

Au quotidien, il met en œuvre les différentes étapes des opérations définies par l'ingénieur de recherche, de la réaction nouvelle l'optimisation

Il travaille en laboratoire avec du matériel très diversifié qu'il sélectionne selon les besoins : matériel de synthèse, équipements de tests et d'analyses physico chimiques, matériel informatique

Il est confronté en permanence à la nouveauté

Il travaille dans le cadre de la réglementation qui définit des règles strictes en matière d'hygiène de sécurité et d'environnement

## Formation et prérequis

- Bac +2 (BTS ou DUT) ou Bac +3 (licence professionnelle chimie)
- En formation initiale ou dans le cadre d'un contrat d'alternance en entreprise

## Qualités requises

- Connaissances scientifiques larges en chimie
- Qualité de mise en œuvre technique
- Rigueur et sens aigu de l'observation et de l'analyse
- Savoir travailler en équipe

## Salaire en début de carrière

- 20 à 30 K€

## Environnement de travail

- Il travaille au laboratoire de R&D au sein d'une équipe de recherche sous la responsabilité de l'ingénieur de recherche
- Contact avec les membres des équipés de fabrication et d'analyse

## Débouchés et évolutions

- Après formation, responsabilité d'une équipe de recherche, de production ou d'analyse

# Responsable / ingénieur Hygiène, sécurité, environnement

> Au quotidien, il a la responsabilité d'évaluer les risques inhérents à l'activité de l'entreprise et de proposer à la Direction Générale une politique de prévention et d'intervention. Il définit les actions et pilote leur mise en place pour tout ce qui concerne la protection des personnes et des installations, la pollution de l'air et de l'eau, les nuisances sonores, le traitement des déchets. Il contrôle à tous les niveaux, la prise en compte de ces actions sur le terrain. Il anime une équipe de techniciens. Il a la responsabilité de faire appliquer la réglementation et à ce titre organise l'information et la formation du personnel. En cas d'incident ou d'accident il coordonne les différentes actions à mettre en œuvre.

## Formation et prérequis

- Bac +5 (École d'ingénieurs ou Maîtrise professionnelle en chimie, environnement, sécurité)

## Qualités requises

- Compétences multiples : scientifiques, techniques, droit et règlementation, économiques
- Avoir une bonne connaissance du site et de l'équipement
- Savoir communiquer, être pédagogue, savoir convaincre
- Autonomie : être réactif, savoir prendre des décisions
- Capacité de gestion de conflits

## Salaire en début de carrière

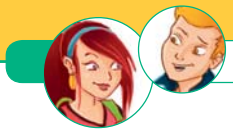
- 45 à 60 K€

## Débouchés et évolutions

- Responsable assurance qualité du groupe
- Responsable d'usine

## Environnement de travail

- Le site de production
- Il interagit avec l'ensemble des secteurs de l'entreprise et avec les autorités extérieures concernées : les pompiers, la sécurité civile, la médecine et l'inspection du travail, la Direction Régionale de la Recherche et de l'Environnement
- Déplacement au siège pour séminaires de formation
- Il participe à des colloques et séminaires en France et à l'étranger



# Responsable de Laboratoire d'analyse et de contrôle qualité

« Au quotidien, il dirige, planifie et organise les activités, les projets, les moyens humains, techniques et budgétaires d'un laboratoire d'analyses spécialisé en une ou plusieurs techniques parmi lesquelles les méthodes d'analyses spectroscopiques, chromatographiques, électrochimiques, microscopie électroniques, d'imageries… Dans la phase de développement il définit avec le chef de projet les caractéristiques et spécification des produits et matières premières et en assure le suivi. Sa mission est d'identifier et de caractériser les produits qui lui sont confiés au niveau de la structure, de la pureté, des propriétés physiques et chimiques. Il doit adapter les techniques pour répondre aux questions qui lui sont soumises. Je dois assurer une veille technologique dans mes domaines d'expertises et faire évoluer dès que nécessaire les équipements dont il dispose. Il doit assurer la formation si les techniques sont délocalisées au sein des laboratoires ou des ateliers. »

### Formation et prérequis

- Bac +5 (École d'ingénieurs ou maîtrise de chimie analytique) en formation initiale ou dans le cadre d'un contrat d'alternance
- Bac +8 (doctorat avec stage d'un an sur une technique de pointe)

### Qualités requises

- Connaissances approfondies en chimie et dans les différentes techniques d'analyses
- Rigueur, patience et minutie
- Sens de l'organisation sur le plan scientifique et humain

### Salaire en début de carrière

- 40 à 60 K€

### Environnement de travail

- Site de production et Centre de R&D
- Il travaille avec le contrôleur de Qualité et est en relation avec les autres services pour contrôler les produits en cours de fabrication ou de Développement
- Il est en relations fréquentes avec les autres services intérieurs et extérieurs à l'entreprise
- Il assiste à des colloques et séminaires scientifiques en France et à l'étranger

### Débouchés et évolutions

- Responsable de l'assurance qualité au niveau du groupe

# Technicien d'analyses

Au quotidien, il seconde le responsable du laboratoire et réalise les tests de contrôle qualité et les analyses physico chimiques. Il conçoit les fiches d'analyses, met au point de nouveaux protocoles, restitue les résultats et effectue des rapports de synthèse. Il travaille en général dans un laboratoire multi techniques en collaboration étroite avec les équipes de R&D.

## Formation et prérequis

- Bac +2 (BTS ou DUT chimie ou mesures physiques)
- Bac +3 (licence professionnelle : chimie ou mesures physiques) en formation initiale ou dans le cadre d'un contrat d'alternance

## Qualités requises

Rigueur, sens de l'organisation, bonne capacité d'analyse

## Environnement de travail

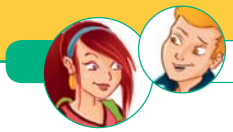
Laboratoire de contrôle et d'analyses sur le site de production ou dans un centre de R&D
Contact avec le responsable du labo, les agents de fabrication et les équipes de chimistes de R&D

## Salaire en début de carrière

20 à 30 K€

## Débouchés et évolutions

Après formation : poste de responsabilité en laboratoire d'analyses, de procédés, ou de fabrication



# Responsable de production / Directeur de fabrication

« Au quotidien, il est responsable des moyens humains et technique et à ce titre coordonne l'ensemble des unités de production. Il définit les allocations de moyens et gère les priorités par rapport aux ressources humaines et financières en cohérence avec la stratégie de l'entreprise. Il veille à l'adaptation et à l'évolution de l'outil de production ainsi qu'au développement des équipes. Il fait respecter les règles relatives à l'hygiène, la sécurité et le respect de l'environnement. »

### Formation et prérequis

- Bac +5 (École d'ingénieurs ou Maîtrise professionnelle en chimie, génie chimique ou procédés)
- Ces formations se font en formation initiale ou en alternance

### Qualités requises

- Compétences pluridisciplinaires en chimie, génie chimique, techniques industrielles, management, gestion
- Sens des relations humaines

### Salaire en début de carrière

- 40 à 60 K€

### Environnement de travail

- Site de production : travail collaboratif important
- Déplacements surtout locaux et régionaux

### Débouchés et évolutions

- Large gamme de postes possibles de responsable industriel en usine de plus grande taille ou au siège

# Technicien de fabrication

« Au quotidien, il est amené à intervenir tout au long de la chaine de production, en contrôle, en support ou dans le cas de dysfonctionnement. Il doit donc connaitre toutes les phases des opérations de production et le matériel de contrôle et d'automatisation. Il intervient en support technique pour démarrer de nouvelles productions ou pour améliorer des productions existantes. Il peut aussi piloter tout ou partie d'une installation complexe d'équipements plus ou moins automatisés. Il peut être conduit à former des opérateurs et des agents de maitrise sur les nouvelles productions et les nouveaux équipements »

## Formation et prérequis

- Bac +2 (BTS ou DUT chimie ou génie chimique)
- Bac +3 (licence professionnelle chimie ou génie chimique) en formation initiale ou dans le cadre d'un contrat d'alternance

## Qualités requises

- Des compétences multiples larges en chimie physico-chimie, et en technologies des installations industrielles
- Rigueur, grande réactivité
- Sens des responsabilités, ouverture d'esprit

## Salaire en début de carrière

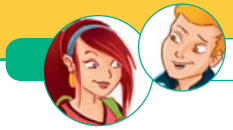
- 20 à 30 K€

## Environnement de travail

- Le site de production
- Contrairement à l'agent de maîtrise il n'a pas en général d'équipe à manager mais il collabore avec les opérateurs et les agents de maîtrise
- Déplacements locaux ou régionaux

## Débouchés et évolutions

- Possibilité de formation professionnelle sur plusieurs années pour devenir ingénieur procédés ou ingénieur de fabrication



# Directeur commercial / Directeur des ventes

« Au quotidien, il a une parfaite connaissance des produits de l'entreprise. Il possède une double compétence scientifique /technique et commerciale et travaille en collaboration étroite avec les équipes de production et de marketing. Il organise et coordonne l'activité des équipes commerciales. Il organise le réseau commercial et sa présence géographique et il les adapte à l'évolution du marché. Il anime et motive les équipes, évalue les résultats collectifs et individuels et contribue à la formation de ses collaborateurs. Il gère des budgets de fonctionnement, d'investissement, de promotion et de publicité. »

## Formation et prérequis

- Bac +5 avec éventuellement une formation complémentaire (École d'ingénieurs + formation commerciale, École de Commerce + formation scientifique, Maîtrise professionnelle spécialisée + École de Commerce)
- Maîtrise de l'anglais
- Une expérience professionnelle de 5 à 10 ans est généralement requise

## Qualités requises

- Charisme, avoir un bon relationnel, être réactif et pédagogue
- Être un bon manager et un excellent négociateur

## Salaire en début de carrière

- Négocié
- 60 à 100 K€

## Environnement de travail

- Le siège de l'entreprise mais il est en relation avec tout le réseau commercial national et international de l'entreprise, ainsi qu'avec les chefs de projets
- Il peut être aussi localisé dans une filiale à l'étranger
- Nombreux déplacements nationaux et internationaux

# Responsable marketing

Au quotidien, il doit avoir une vision globale de l'entreprise afin de savoir détecter les opportunités de marchés ou de produits sur la base des besoins des clients (grand public et professionnels) en prenant en compte la position de la concurrence. Il propose à la Direction générale une politique de marketing et contribue ainsi à l'orientation des axes de R&D ainsi qu'à l'amélioration des produits existants. Il anime une équipe de chargés d'études et d'assistants marketing. Il participe à la fixation des prix, au lancement des produits, à la politique de communication.

## Formation et prérequis

- Double compétence scientifique/technique et marketing
- Bac +5 (École d'ingénieurs + formation marketing, Maîtrise professionnelle + formation marketing, École de Commerce)
- Bonne maîtrise de l'anglais

## Qualités requises

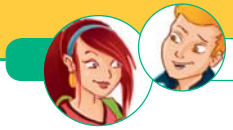
- Rigueur, qualités d'analyses et d'anticipation
- Créativité
- Capacité managériale

## Environnement de travail

- Siège ou site de production
- Travaille avec les équipes de production de R&D, de vente et de finance
- Participe à des salons et séminaires en France et à l'étranger

## Salaire en début de carrière

- 40 à 70 K€



# Ingénieur technico-commercial

« Au quotidien, il est à l'écoute d'une clientèle de professionnels auxquels il doit apporter des solutions techniques sous forme de produits ou d'équipements. Pour cela il doit connaître les produits de l'entreprise au plan technique, et savoir les adapter aux besoins des clients. Il a un rôle de conseil important. Il veille à la disponibilité des produits et à l'efficacité du service après vente. Il est donc en relation étroite avec la production et les équipes de marketing. L'aspect négociation des conditions commerciales fait partie de sa mission. Il gère et fait évoluer un portefeuille client. »

## Formation et prérequis

- Le métier nécessite une double compétence scientifique/ technique et commerciale
- Bac +5 (École d'ingénieurs + formation commerciale, École de Commerce + formation scientifique)
- Bonne maîtrise de l'anglais
- Une formation Bac +2 ou Bac +3 à caractère scientifique peut permettre après plusieurs années d'expérience dans l'activité commerciale d'atteindre ce poste

## Qualités requises

- Qualités de contact, de diplomatie
- Sens de la communication et de la négociation
- Rigueur dans le respect des règlementations commerciales

## Débouchés et évolutions

- Directeur de vente, chef de projet

## Salaire en début de carrière

- 40 à 50 K€

## Environnement de travail

- Siège ou site de production
- Autonomie dans la gestion du temps et des priorités
- Clientèle localisée sur une zone géographique plus ou moins importante entrainant de nombreux déplacements
- Relations nombreuses avec les équipes de production, de R&D, de marketing

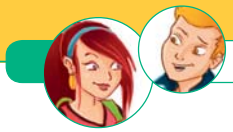
4 PARTIE

# LE COIN DES JEUX

par Michel Criton

## ÉNIGMES

## MOTS CROISÉS



# ÉNIGMES

Des solutions détaillées sont proposées sur le site de Médiachimie dans l'espace éducation collège (mediachimie.org).
Le niveau requis pour chaque exercice est précisé grâce au symbole : ★ (de la 6e à la 4e) ; ★★ (à partir de la 3e).

## Un octet qu'est-ce que c'est ?★

Max demande à Léa « Sais-tu s'il y a un rapport entre l'octane et un octet ? » Léa lui répond « Oui, c'est le nombre huit : l'octane est un hydrocarbure dont la molécule compte huit atomes de carbone et un octet est composé de huit bits d'information (un bit, contraction de l'anglais *binary digit*, étant un chiffre 0 ou 1) ».
« C'est vrai que les ordinateurs ne comprennent que les chiffres 0 et 1 ; ainsi 00101101 est un exemple d'octet » réplique Max.

***Avec des 0 et des 1, combien peut-on former d'octets différents de 00000000 à 11111111 ?***

### Coup de pouce

Avec deux chiffres choisis parmi 0 et 1, on peut former quatre nombres : 00, 01, 10 et 11.
Avec trois chiffres, on peut en former huit : 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 et 111.
Dans le système de numération que nous utilisons habituellement, les unités sont regroupées en dizaines, les dizaines en dizaines de dizaines (les centaines), etc. En informatique, on compte par « deuzaines » (groupements de deux unités). Les deuzaines sont regroupées en quatraines (deux deuzaines), les quatraines en huitaines (deux quatraines), etc.

**Réponse :** 256 octets.

## Vous m'en mettrez un kilo !★

Léa : « Je n'y comprends rien, j'ai lu qu'un kilo-octet c'était 1 024 octets, alors que le préfixe kilo signifie mille, peux-tu m'éclairer ? »
Max lui répond : « C'est un peu compliqué. Au début de l'informatique, on a décidé qu'un kilo-octet était égal à 2×2×2×2×2×2×2×2×2×2, c'est-à-dire à 1 024 octets (c'est 2 élevé à la puissance 10, mais tu apprendras cela en quatrième), parce que 1 024 est proche de 1 000. Pour remédier à cette confusion, au début des années 2000, l'ISO (International Standardization Organisation), qui définit les unités légales, a défini le kibi-octet (Kio), égal à 1 024 octets, le kilo-octet valant désormais exactement 1 000 octets selon la véritable signification du préfixe kilo, mais les habitudes sont fortes et très peu de gens utilisent le kibi-octet ».

***Sachant qu'un méga-octet est égal à 1 000 kilo-octets et un mébi-octet à 1 024 kibi-octets, Combien d'octets compte la différence entre un mébi-octet et un méga-octet ?***

**Coup de pouce**

Un méga-octet compte 1 000 × 1 000 octets. Pour calculer le nombre d'octets contenus dans un mébi-octet, il faut faire le même calcul en remplaçant 1 000 par 1 024.

**Réponse :** 48 576 octets.

## La loi de Moore★ (voir page 69)

En 1975, un ingénieur américain, Gordon Moore, formula la loi empirique suivante : le nombre de transistors des microprocesseurs que l'on peut intégrer sur une puce de silicium double tous les deux ans (par la suite le délai de deux ans sera raccourci pour s'adapter à la réalité).

**Si l'on suppose cette loi exacte, entre 1975 et 2015, par combien le nombre de transistors intégrables sur une puce de silicium aurait-il été multiplié ?**

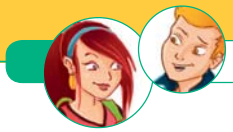
**Coup de pouce**

En 1977, le nombre de transistors aurait été multiplié par 2, en 1979 par 2 × 2, c'est-à-dire par 4, en 1981 par 2 × 4, autrement dit par 8, etc.

**Réponse :** le nombre de transistors aurait été multiplié par 1 048 576.

## Neurones *vs.* transistors★

Max : « À ton avis, y a-t-il plus de transistors dans le microprocesseur de ma tablette que de neurones dans mon cerveau ? »



**Coup de pouce**

1 $cm^3$ = 1 000 $mm^3$. Le nombre de neurones d'un cerveau humain est donc égal à environ 1 500 × 1 000 × 10 000.

Léa : « Il suffit de comparer ! Aujourd'hui, un microprocesseur d'ordinateur ou de tablette peut intégrer jusqu'à 2,5 milliards de transistors. Ton cerveau a un volume d'environ 1 500 $cm^3$ et 1 $mm^3$ de matière cérébrale contient environ 10 000 neurones ».

***Que répondriez-vous à Max ?***

**Réponse :** un cerveau humain compte environ 15 milliards de neurones, soit six fois plus que le nombre de transistors d'un microprocesseur.

**Coup de pouce**

1 % = 1/100 (un centième). Un millionième de pourcent est donc égal à un millionième d'un centième, soit un cent-millionième, ou encore 1/100 000 000.

## Pureté de la fibre optique★

Léa : « Une fibre optique est constituée de silice extrêmement pure, ce qui lui permet de transmettre quasiment sans perte un signal lumineux sur plusieurs dizaines de kilomètres. »
Max : « Même si cette silice est extrêmement pure, elle contient bien quelques atomes d'impuretés, non ? »
Léa : « bien sûr, mais ces impuretés représentent moins d'un millionième de pourcent de la fibre. »

***Sur 100 milliards de molécules, on devrait donc trouver au plus combien de molécules ou d'atomes d'impuretés ?***

**Réponse :** 1 000 molécules.

## L'encyclopédie★

Léa : « Sais-tu qu'une fibre optique peut transmettre 10 milliards d'impulsions lumineuses par seconde ? ».
Max : « La grande encyclopédie de mes parents contient 5 000 pages de 1 200 caractères chacune. Si on code chaque caractère sur un octet de 8 bits, chaque bit correspondant à une impulsion lumineuse, je me demande combien de secondes il faudrait pour la transmettre intégralement par fibre optique. »

**Coup de pouce**

Pour transmettre une page, il faut 1 200 × 8 impulsions.

***Sauriez-vous répondre à l'interrogation de Max ?***

**Réponse :** il faudrait 0,0048 seconde, soit environ 5 millièmes de seconde.

## Le graphène★★

Léa : « Sais-tu quel est le matériau du futur que l'on trouvera dans les écrans souples ? Ce matériau, que l'on croyait impossible à réaliser, n'a été découvert qu'en 2004 ».
Max : « Oui, c'est le graphène, qui est constitué d'atomes de carbone disposés en un réseau plat à mailles hexagonales. Ce matériau a effectivement des propriétés mécaniques et électriques remarquables ! ».

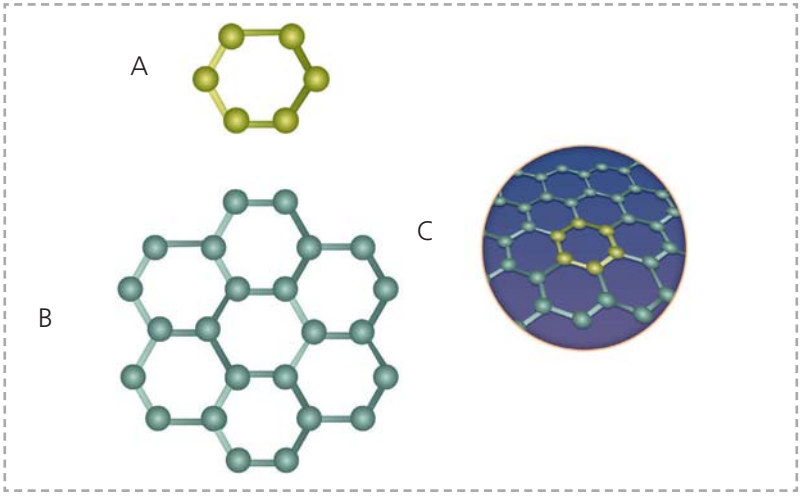
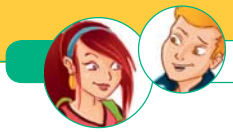



**Figure 1**

**A)** Maille hexagonale de graphène ;
**B)** sept mailles hexagonale de graphène.
**C)** ?.

La *figure 1A* représente une maille hexagonale de graphène.



**Coup de pouce**

Pour passer de la *figure 1A* à la *figure 1B*, on ajoute six mailles. Pour passer de la *figure 1B* à la *figure 1C*, on doit ajouter 12 mailles, etc.

Sur la *figure 1B*, on a entouré cette maille de six mailles hexagonales et on obtient un ensemble de sept mailles hexagonales.
Si on entourait l'ensemble de la *figure 1B* de mailles hexagonales, on obtiendrait une *figure 1C* présentant un nouvel ensemble de 19 mailles hexagonales.

***Combien de mailles obtiendrait-on en construisant les figures 1D et 1E, en ajoutant à chaque étape une couche de mailles hexagonales autour de la figure précédente ?***

**Réponse :** 37 et 61 mailles.

**Coup de pouce**

À chaque étape, on ajoute 12 atomes de plus qu'à l'étape précédente

## Le graphène★★

Max : « Dans une maille de graphène, on compte six atomes de carbone. Combien en compte-t-on dans sept mailles disposées comme sur la figure 1B de l'énigme précédente ? ».
Léa : « Facile, on en compte 18 de plus, c'est-à-dire 24 ! ».

***Combien compterait-on d'atomes de carbone sur les figures 1C et 1D, chaque figure étant construite en entourant la précédente d'une couche de mailles hexagonales ?***

**Réponse :** 54 et 96.

## Dopage à l'erbium★★

Léa : « Sais-tu que l'erbium est un élément servant à doper les fibres optiques ? »
Max : « Oui, le signal lumineux subit inévitablement des pertes et s'affaiblit. Il faut donc régulièrement amplifier le signal et pour cela on utilise des atomes d'erbium excités. Pour chaque photon reçu (un photon est un « grain de lumière »), un atome d'erbium se désexcite en émettant un nouveau photon, ce qui a pour effet de doubler le signal lumineux ».

***Si on suppose que 64 photons rencontrent successivement six atomes d'erbium excités et que seuls 50 % des photons produits par un atome d'erbium sont « utiles » et rencontrent les atomes***

***d'erbium suivants, combien de photons « utiles » comptera-t-on après le 6e atome d'erbium ?***

### Coup de pouce

- Après le 1er atome d'erbium, on comptera 64 + 32 photons, soit 96 photons « utiles ».
- Après le 2e atome d'erbium, on comptera 96 + 48 photons, soit 144 photons « utiles ».
- Après le 3e atome d'erbium, on comptera 144 + 72 photons, soit 216 photons « utiles ».

**Réponse :** 729 photons.

## Les flops de l'ordinateur★★

Max : « Mon dernier contrôle de math a été un flop. »
Léa : « Sais-tu ce qu'est un flop pour notre ordinateur ? »
Max : « C'est peut-être un bug ? Une erreur informatique ? »
Léa : « Pas du tout. *flop* est un acronyme anglais signifiant *floating-point operations per second*. Cela correspond au nombre d'opérations à virgule flottante que l'ordinateur peut effectuer par seconde.
Les ordinateurs les plus performants au monde ont actuellement une puissance de presque 50 pétaflops. »
Un pétaflop est égal à $10^{15}$ flops, c'est-à-dire à un million de milliards de flops. Mais on a déjà défini des multiples plus grands encore : l'exaflop qui vaut $10^{18}$ flops, le zettaflop qui vaut $10^{21}$ flops et le yottaflop qui vaut $10^{24}$ flops.

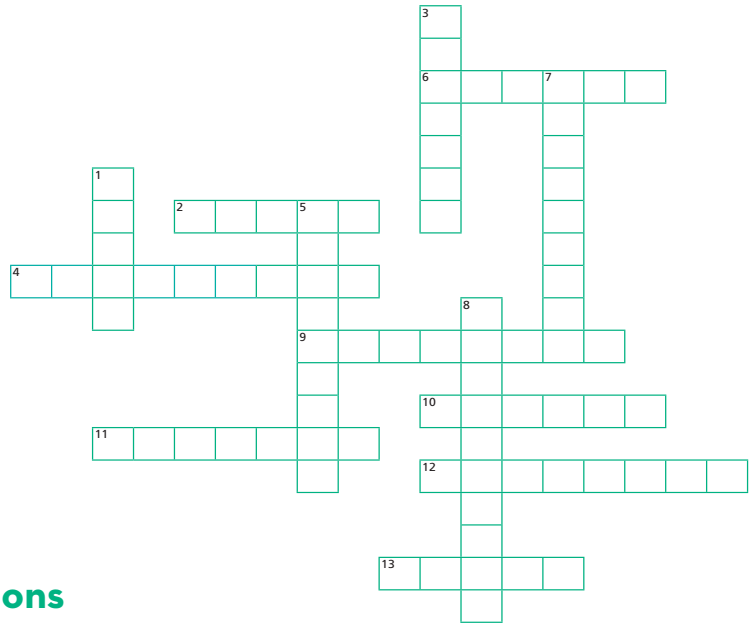
### Coup de pouce

Lorsque l'on passe de $10^{15}$ à $10^{24}$, on ajoute 9 zéros.

***Combien y a-t-il de pétaflops dans un yottaflop ?***

**Réponse :** un milliard.

# MOTS CROISÉS



## Définitions

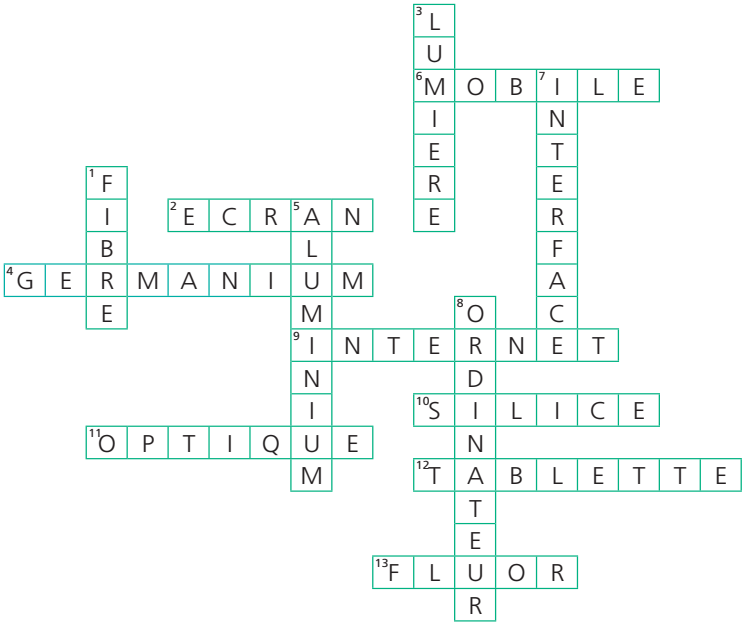
### Horizontalement

2. Votre téléphone, votre tablette et votre ordinateur en possèdent un.
4. Élément chimique de numéro atomique 32. On l'utilise comme élément dopant dans les fibres optiques.
6. Adjectif parfois utilisé pour désigner un téléphone portable.
9. C'est un immense réseau qui couvre la planète entière.
10. Elle constitue le matériau principal des fibres optiques.
11. Branche de la physique qui traite de la lumière et de ses propriétés.
12. Plus grandes qu'un smartphone, mais plus légères qu'un ordinateur, elles offrent les mêmes fonctionnalités et se transportent aisément partout.
13. On l'utilise comme élément dopant dans les fibres optiques. Il est également réputé pour ses propriétés en hygiène dentaire.

### Verticalement

1. Élément constitutif d'un fil.
3. Elle se déplace à une vitesse de 300 000 km par seconde.
5. Élément chimique de numéro atomique 13. On l'utilise comme élément dopant dans les fibres optiques.
7. Couche limite entre deux éléments.
8. Mot créé en 1955 par Jacques Perret pour désigner une machine électronique que les Anglo-Saxons appellent « computer ».

## Solution


3 L
U
6 M O B 7 I L E
I N
E T
R E
E R
1 F
I 2 E C R 5 A N
B L
4 G E R M A N I U M
E F
M A
8 O C
9 I N T E R N E T
N D
I 10 S I L I C E
11 O P T I Q U E N
M 12 T A B L E T T E
T
E
13 F L U O R
R